

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЬНЫХ БАЛОК ДВУТАВРОВОГО СЕЧЕНИЯ

*В.Е. Волкова, И.С. Смолий, Национальный горный университет, Украина*

В статье представлены результаты численного моделирования динамического поведения сварных металлических балок конвейерных галерей симметричного поперечного сечения. Исследованы закономерности влияния направления приложения нагрузки на амплитудно-частотные зависимости вынужденных колебаний металлических балок открытого сечения, а также частоты и формы собственных колебаний.

Тонкостенные балки в строительстве применяются с 1970-х годов. Они являются воплощением идеи о тесной связи показателей экономической эффективности с понятием тонкостенности. Уменьшение относительной толщины стенки в 2-3 раза приводит к снижению расхода металла на стенку на 25-35% и к концентрации металла в поясах, что выгодно при работе на изгиб. [1]

Сфера использования металлических двутавровых сварных тонкостенных балок не ограничена лишь конструкциями, воспринимающими статические нагрузки, они также широко используются в конструкциях, работающих в условиях динамических нагрузок. Такие балки могут использоваться в конструкциях пролетных строений галерей шахтных комплексов, в которых динамика обусловлена работой конвейерного транспорта.

Однако украинскими нормами ограничено использование тонкостенных балок в системах с динамической нагрузкой, вследствие слабой изученности процессов, происходящих в тонкостенных балках. Малая металлоемкость тонкостенных балок, и соответственно, экономия материала при производстве, обуславливает актуальность настоящего исследования. Эксплуатационные требования к пролетным строениям конвейерных галерей включают ряд ограничений на величины динамических характеристик применяемых конструкций. Исследование влияния изменения поперечного сечения балки на амплитудно-частотные характеристики двутавровых тонкостенных металлических балок открытого сечения является актуальной научной задачей. Целью исследования является установление взаимосвязи между направлением приложения нагрузки к стальной двутавровой тонкостенной балке и её амплитудно-частотными характеристиками, а также, частотами и собственными формами колебаний.

В реальных конструкциях возможны начальные несовершенства элементов, а именно погнутости, изгиб под поперечной нагрузкой, а также и другие неблагоприятные факторы. Ввиду этого, предельное соотношение  $b_f/t_f$ , рекомендованное нормами, несколько ниже, чем получаемое на основе идеализированной расчетной схемы. Так, для неокаймленной полки двутавра и тавра оно составляет  $b_f b_f / t_f = 0,5\sqrt{E/R_y}$ , что для стали с расчетным сопротивлением  $R_y=235$  МПа дает значение предельного относительного свеса полки  $b_f/t_f = 14,8$ ; если расчет выполняют без учета развития пластических деформаций. Если же сечение балки подобрано с учетом развития пластических деформаций, то предельный свес полки назначают в зависимости от соотношения размеров стенки  $\frac{b_f}{t_f} \frac{b_f}{t_f} = 0,11h_w/t_w$ , но не более  $0,5\sqrt{E/R_y}$ . [1]

Вынужденными колебаниями системы называют движение, возбуждаемое и поддерживаемое внешними воздействиями. В зависимости от характера внешнего воздействия в сооружении могут возбуждаться различные динамические процессы. При рассмотрении динамического поведения систем со многими степенями свободы были выявлены общие закономерности – основной чертой динамического поведения является наличие нескольких резонансных зон частот. Совокупность внешних динамических воздействий можно разделить на два класса: длительные и кратковременные. При длительных

воздействиях обычно рассматривают поведение конструкции на протяжении больших промежутков времени. Если механическая система описывается системой линейных дифференциальных уравнения, то в таких задачах начальные условия не оказывают существенного влияния на стационарные режимы колебаний.

Колебания системы описываются системой дифференциальных уравнений. В зависимости от того, являются ли уравнения, входящие в систему линейными или нелинейными, разделяют линейные и нелинейные колебания соответственно. Исследование нелинейных колебаний значительно усложняется, т.к. не существует общих методов решения нелинейных дифференциальных уравнений. Однако, если система дифференциальных уравнений, описывающих колебания, является линейной, начальные условия не влияют на установление режимов колебания системы. [2] Уравнение движения имеет следующий вид:

$$m \cdot \ddot{v} + c \cdot \dot{v} + kv = P(t) \quad (1)$$

$m$  – матрица масс,  $v$  – вектор перемещений, характеризующий форму деформаций,  $c$  – матрица затухания,  $k$  – матрица жесткости, определяемая динамическими параметрами системы. [3]

При пуске и остановке конвейера, т. е. в переходные периоды его движения, на тяговый элемент кроме статических, действуют также динамические силы, зависящие от величины движущихся масс и ускорения (соответственно положительного и отрицательного).

В период пуска двигателем затрачивается дополнительная работа на сообщение массам кинетической энергии; в период останова, напротив, кинетическая энергия движущихся масс поглощается. На конвейере с тяговым элементом часть этих масс имеет поступательное движение, часть — вращательное. [4]

Ленточные конвейеры передают на поддерживаемые конструкции следующие нагрузки: вертикальная нагрузка от собственного веса конвейера, транспортируемого груза, просыпи, материалов и людей; продольные нагрузки от конвейера; динамические, создаваемые подвижными частями конвейера; аварийные нагрузки от обрыва и заклинивания ленты конвейера. [5]

Численное моделирование вынужденных колебаний выполнялось на основе метода конечных элементов в среде ПК “SCAD”. Интегрирование систем дифференциальных уравнений было реализовано при помощи блочного метода Ланцоша, имеющему ряд преимуществ по сравнению с классическим неблочным методом расчета [6]. Особенностью метода конечных элементов является объединение метода сосредоточенных масс и обобщенных координат. Тонкостенная балочная конструкция моделировалась как система пластинчатых четырехузловых элементов. Размеры пластин принимались путем оценки сходимости результатов моделирования при изменении шага сетки конечных элементов. [3].

При исследовании собственных колебаний шарнирно опертой тонкостенной балки анализировались десять форм колебаний, такое количество было принято во избежание накопления ошибок интегрирования. Заметим, что действующими нормами [7] рекомендуется рассматривать 3-5 низших форм колебаний.

При моделировании конструкция анализируется как совокупность конструктивных элементов, соединенных между собой в узловых точках. При заданных соотношениях между силами и перемещениями для каждого отдельного элемента, можно исследовать поведение конструкции в целом [8].

Среди различных причин, обуславливающих гашение колебаний механических систем, особый интерес представляет естественное поглощение энергия колебаний в материале упругих элементов самой колебательной системы. Реальный материал способен при его циклическом деформировании в большей или меньшей степени поглощать энергию циклического деформирования, преобразуя ее в теплоту, которая затем рассеивается.

Способность материала необратимо поглощать механическую энергию, обусловлена его несовершенной упругостью, проявляющейся в нелинейности и неоднозначности зависимостей между напряжением и деформацией при загрузке и разгрузке. Это приводит к образованию петли гистерезиса, площадью которой характеризуется величина поглощенной

(или рассеянной) в единице объема материала энергии  $\Delta U(\varepsilon_0)$  за цикл его деформирования с данной амплитудой деформации  $\varepsilon_0$  (напряжения  $\sigma_0$ ). [9]

В работе выполнен анализ влияния направления приложения нагрузки на динамические характеристики тонкостенных балок открытого сечения.

Исследование выполнялось для балки высотой 2,1 м, толщина стенки составляла 0,13 м. Ширина полки принималась равной 0,64 м, толщина полки 0,064 м. Таким образом, приведенная гибкость стенки составляла  $\bar{\lambda}_w = 5,5$ . В соответствии с [10], балка является тонкостенной.

К балке прикладывалась сосредоточенная нагрузка с шагом 0,8 м по длинной стороне полки в горизонтальном и вертикальном направлении.

При исследовании вынужденных колебаний оценивались значения амплитуд характеристических точек балки, расположенных на линиях:

- a* – линия симметрии полки в направлении оси *Y*,
- b* – линия симметрии стенки в направлении оси *Y*,
- c* – длинная сторона полки.

Для дальнейшего анализа на каждой из этих линий рассматривались пять точек, расположенных на равных расстояниях друг от друга (рис. 1).

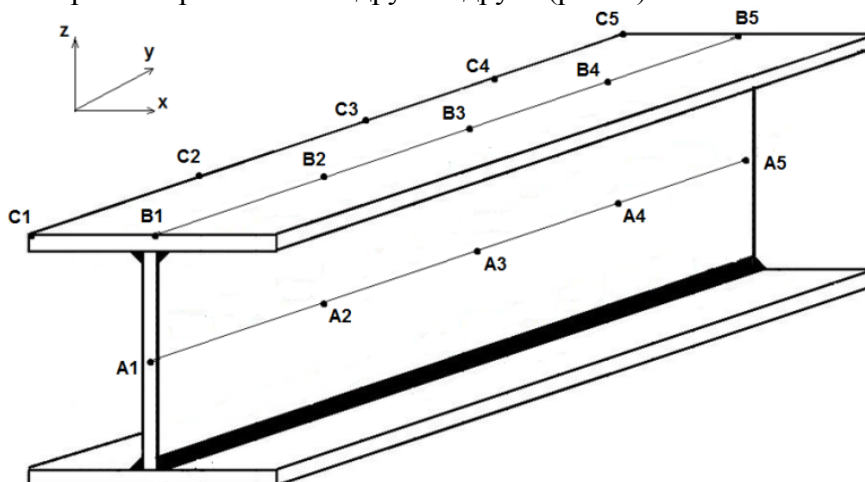


Рисунок 1. Точки контроля амплитудно-частотных характеристик балки

При построении амплитудно-частотных зависимостей частота внешнего возмущения изменялась в диапазоне от 0 до 50 Гц с шагом 0,1 Гц. На основе исследований коэффициент трения был принят равным  $\varepsilon=0,05$ , что позволяет отразить диссипативные свойства легированных стальных сплавов.

В таблице 1 представлены значения собственных частот для первых восьми форм колебаний тонкостенной двутавровой балки.

Таблица 1. Собственные частоты колебаний

Мода $b_f/t_f$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	8,69	10,02	15,95	16,77	18,3	19,52	20,94	22,71	24,89	26,87
20	7,1	9,47	12,4	12,92	16,04	18,36	20,46	22,38	22,67	25,19
30	6,17	8,94	10,08	12,05	12,66	15,23	17,81	20,51	23,42	23,84
40	5,84	8,66	9,33	11,47	12,24	13,8	16,33	19,1	22,13	25,03

Проанализируем колебания точек, расположенных по нейтральной оси балки, линия *a*. На амплитудно-частотных характеристиках можно выделить два резонансных диапазона частот. Первый резонансный диапазон колебаний (рис. 2) устанавливается на частотах 8...9 Гц, что соответствует значениям низших собственной частоты определяемой на основании формул

Власова  $\omega_0$ . Наибольшие амплитуды вынужденных колебаний стенки балки, в точках А1...А5, наблюдались при частоте 15,95 Гц, и соответствовала третьей форме собственных колебаний. Данная форма колебаний представляет собой безузловую изгибную форму в горизонтальной плоскости.

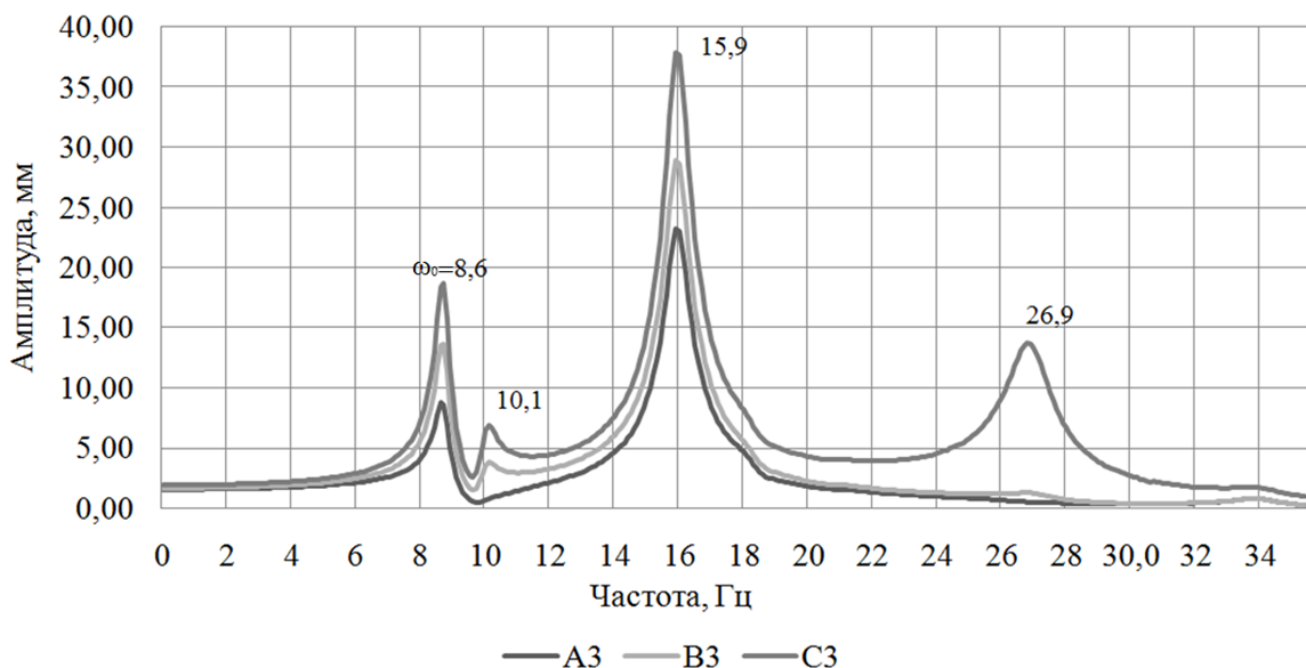


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики двутавровой балки при вертикальном приложении нагрузки

Амплитуды вынужденных колебаний фиксировались в точках, расположенных по линиям *b* и *c*. Сопоставляя графики амплитудно-частотных характеристик для точек В и С, можно отметить, что максимальные амплитуды вынужденных колебаний устанавливаются на частоте 15,95 Гц. Однако, число резонансных диапазонов частот для точек, расположенных по линии *b* и *c* – четыре. Заметим, что амплитуды вынужденных колебаний на частотах близких к значению  $\omega_0$ , не превышают значений на  $\omega = 15,95$  Гц для линии *b*, и  $\omega = 15,95$  и 27,6 Гц для *c*. Колебания на частотах 26,7 Гц поддерживаются десятой формой собственных колебаний. Данная форма проявляется только в точках расположенных по краям полки и её влиянием можно пренебречь для стенки.

На амплитудно-частотных характеристиках точек по линиям *b* и *c* также реализуются резонансные колебания на частоте 10 Гц, что соответствует второй форме собственных колебаний. Амплитуды колебаний в данном диапазоне соизмеримы с амплитудами колебаний на частоте  $\omega_0$ .

Реакция балки на горизонтальное возмущение имеет иную структуру. Горизонтальное внешнее возмущение приводит к перераспределению энергии колебаний. Так, для точек расположенных по нейтральной оси балки, максимальные амплитуды колебаний устанавливаются на частотах  $\omega_0=8,69$  Гц (рис. 3). Второй резонансный диапазон колебаний поддерживается третьей формой собственных колебаний на частоте 15,95 Гц, амплитуда колебаний в данном диапазоне составляет 45,5% от соответствующих значений для первого резонансного диапазона частот.

Для вынужденных колебаний точек, расположенных по линиям *b* и *c* можно отметить, что внешнее возмущение, приложенное в горизонтальной плоскости способствует установлению резонансных колебаний на частоте 10 Гц, поддерживаемых второй формой собственных колебаний. В то же время, не реализуются колебания на частоте десятой формы (26,9 Гц), а колебания на частоте третьей формы (15,95 Гц) существенно снижают свою амплитуду. Их значения не превышают 37% от колебаний в случае вертикального приложения нагрузки.

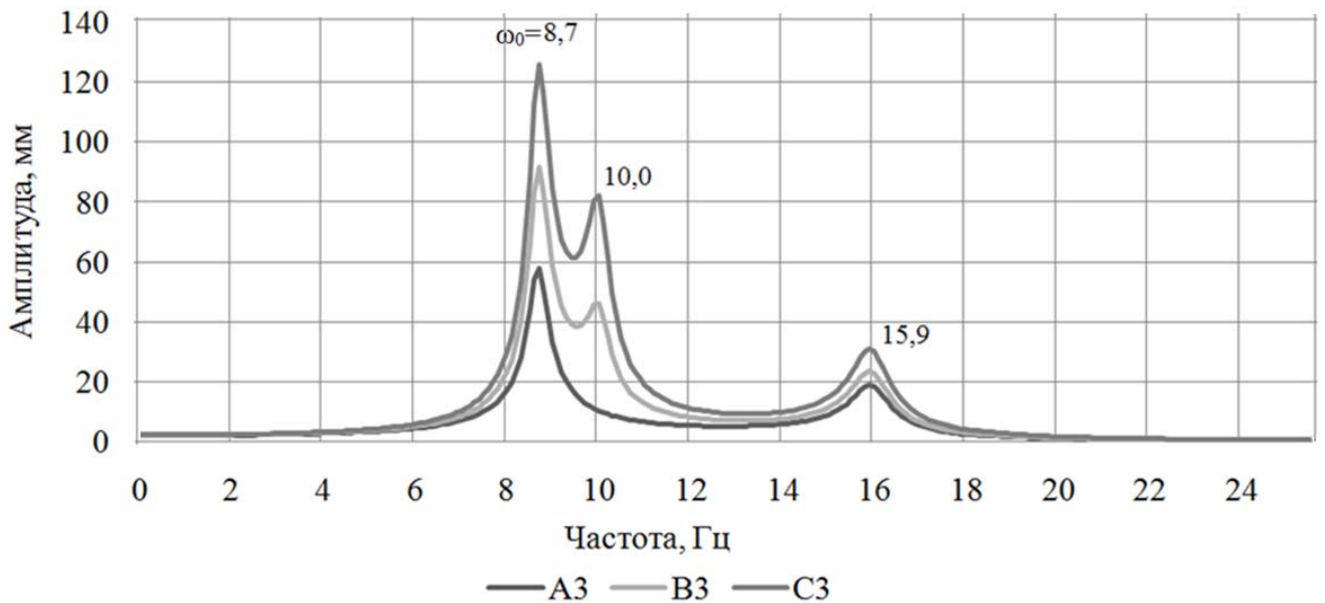


Рисунок 3. Амплитудно-частотные характеристики двутавровой балки при горизонтальном приложении нагрузки

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Первая и третья формы собственных колебаний тонкостенной балки открытого сечения оказывают существенное влияние на формирование резонансных режимов, как при вертикальных возмущающих силах, так и при горизонтальных.
2. Первая и третья формы собственных колебаний проявляются на вынужденных колебаниях, как точек полки, так и точек стенки.
3. Вторая форма колебаний способствует установлению резонансных режимов колебаний точек полки. При горизонтальном внешнем возмущении амплитуды колебаний по второй форме могут превышать амплитуды колебаний на частоте  $\omega_0$ .

#### Список литературы

1. Горев В.В. Металлические конструкции. Том 1 Элементы конструкций / В.В. Горев – М.: Высшая школа, 2002. - 552 с.
2. Баженов В.А., Перельмутер А.В., Шишов О.В. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології: Підручник / В.А. Баженов – К.: Каравела, 2009. – 696 с.
3. Клааф Р., Пензиен Дж Динамика сооружений: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с. – Первод изд.: Dynamics of Structures/Ray W. Clough, J. Penzien. – New York, 1975.
4. Челомей В.Н. Вибрации в технике. Том 1. Колебания линейных систем / В.Н Челомей – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
5. Гордеев В.Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 482 с.
6. Фиалко, С., Реализация в программном комплексе SCAD блочного метода Ланцоша со сдвигами применительно к сейсмическому анализу сооружений [Текст]: Статья. / С. Фиалко – CADmaster, №5/2007 – с. 102-105
7. ДБН В.1.1-12-2014 Будівництво у сейсмічних районах України/ Київ: Мінрегіонбуд, 2014
8. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике [Текст]: Монография / О.К. Зенкевич – Москва: Мир, 1975 – 543 с, с.11
9. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев – Киев: Наукова думка, 1988. – 836 с.
10. ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції/ Київ: Мінрегіонбуд, 2010.