
Исследование аккордеонного эффекта стальных балок с гофрированной стенкой

И.З. Трифунович, Л.Ю. Рыбакова

Самарский государственный технический университет

Аннотация: Оценка прочности на изгиб важна при проектировании стальных балок. В данной работе были проведены аналитические исследования для определения прочности на изгиб обычных стальных двутавровых балок и стальных балок с гофрированной стенкой. Была проанализирована экспериментальная программа для четырех балок с простой опорой и различной конфигурацией стенок (плоской или гофрированной), а также разной толщине полки (тонкой или толстой). В ходе экспериментальных работ было определено влияние уменьшения изгибной способности балки за счет гофрированной стенки. Для моделирования испытанных образцов и проверки результатов экспериментальной части работы использовалась нелинейная методика конечных элементов.

Ключевые слова: проектирование стальных балок, прочность на изгиб, гофрированная стенка, толщина полки, изгибная способность, методика конечных элементов, конфигурация стенки

Введение. Было проведено множество исследований поведения при изгибе стальных балок с ГС. М. Элгаали, Р. Гамильтон и А. Сешадри в своей работе публикуют итоги испытаний тридцати полноразмерных моделей балок с трапециевидно гофрированной стенкой [1]. Данные результатов эксперимента сравнивались с результатами расчета по методу конечных элементов. Сопоставив опытные и теоретические результаты, авторы работы предложили выражения для нахождения предельных касательных напряжений для случаев местной и общей потери устойчивости стенки. Формула для предельных касательных напряжений в случае местной потери устойчивости стенки была получена в ходе рассмотрения плоской панели гофр как изотропной пластинки. Л. Хуанг, Х. Хикосака, К. Комине исследовали методом конечных элементов балки с трапециевидными гофрами при работе на изгиб в работе [2]. Расчеты показали, что осевая жесткость стенки в продольном направлении существенно меньше её жесткости на сдвиг в поперечном направлении, из-за чего нормальные напряжения в стенке распространяются только на незначительном

расстоянии от поясов и быстро затухают (так называемый, «эффект аккордеона»)

Однако у непрерывных балок есть некоторые недостатки из-за геометрических характеристик. Во-первых, местная прочность полки на изгиб может быть меньше, чем у балок с ПС, так как выступ полки в балках с ГС больше, чем у балок с ПС [3]. Во-вторых, в результате эксцентриситета стенки в полках возникает дополнительный поперечный момент в плоскости. Этот момент снижает прочность на изгиб балок с ГС. В-третьих, только полки, за исключением стенки, вносят вклад в прочность на изгиб балок с ГС из-за аккордеонного эффекта [4].

В упомянутых исследованиях были достигнуты различные результаты. Однако все еще существует вопрос в использовании ГС вместо ПС, так как до конца не исследовано влияние на изгибную способность стальных двутавровых балок [5-7]. Таким образом, экспериментальное исследование влияния гофрированной стенки на механизм разрушения при изгибе, которое может произойти в стальных балках, представлено в этой статье.

Соответственно, были проанализированы испытания четырех образцов с различной толщиной стальной полки и конфигурацией стенки [8]. Каждый образец содержал центральную панель, которая подвергалась действию чистого момента, а также усиленные стальные балки с плоскими панелями, примыкающими к опоре, которые использовались в этом экспериментальном исследовании [9, 10]. Четыре стальные балки, разделенные на две группы в зависимости от формы стенки, по две балки в каждой. Разница между двумя группами заключалась в конфигурации стенки и толщине полки. Первая группа состояла из двух балок с ГС, при разной толщине полок. Вторая группа состояла из двух балок с ПС и также разной толщиной полок. Все образцы были испытаны при четырёхточечном изгибе с нагрузкой в одной

трети пролета, что привело к нулевому сдвигу и постоянному моменту в средней трети пролета.

Изготовление образцов для испытаний. Чтобы определить поведение при изгибе и прочность стальной балки с ПС и сравнить с балками, имеющими аналогичные свойства и размеры, но с ГС, полномасштабные балки ПС или ГС были испытаны при четырехточечной нагрузке. Испытанные балки имеют длину 1850 мм с эффективным пролетом 1750 мм. Балки состоят из двух усиленных панелей и центральной тонкой панели. ПС и ГС были присоединены к полкам только с одной стороны непрерывными угловыми швами с катетом 4 мм, при помощи дуговой сварки в газовой среде. Соблюдались тщательные процедуры сварки, чтобы избежать деформации балки в результате высокой температуры при сварочном процессе, особенно для тонких деталей. Характеристики балок представлены в таблице №1

Таблица № 1

Характеристики испытываемых образцов

Код образца	h , мм	t_w , мм	b_f	t_f	h/t_w	λ_p
ГС101	400	2,1	100	4	200	18,75
ГС102	400	2,1	100	10	200	7,5
ПС101	400	2,1	100	4	200	12,5
ПС102	400	2,1	100	10	200	5

Условия проведения испытаний: Образцы испытывали при двухлинейной нагрузке. Сосредоточенная нагрузка от привода распределялась по передаточной балке. Усилие 1000 кН. Центральная часть с плоской или гофрированной стенкой ($L = 0,4$ м), подвергалась воздействию постоянного изгибающего момента. С обеих сторон центральной части, ($L1 = 0,75$ м), использовалась ПС из пластин толщиной 12 мм с вертикальными и

горизонтальными ребрами жесткости для предотвращения потери устойчивости при сдвиге.

Проведение тестирования образцов: Для определения механических свойств стали, использованной в этой экспериментальной работе, из каждой балки были вырезаны три стандартных образца; первый из сжатой полки, второй из растянутой полки и третий из стенки. Образцы вырезали как можно дальше от стороны газовой резки и обрабатывали с точностью до 0,01 мм. Образцы были приготовлены и испытаны соответственно. Такие результаты, как модуль упругости, относительное удлинение, предельное напряжение и предел текучести, полученные в результате этих испытаний, перечислены в таблице №2. Растянутые образцы были испытаны на испытательной машине с контролируемым перемещением мощностью 500 кН с использованием фрикционных захватов для приложения нагрузки. Средние значения пределов текучести полок и стенок по результатам испытаний образцов приведены в таблице №2. Средний предел текучести полки толщиной 10 мм, σ составил 280 МПа. Средний предел текучести гофрированной стенки σ составил 310 МПа.

Таблица № 2

Результаты полученных значений для образцов

Тип образца	$F_Y, \text{Н/мм}^2$	$F_u, \text{Н/мм}^2$	$E, \text{Н/мм}^2$	$\square, \%$
Тонкая полка	300	375	200000	28
Толстая полка	320	390	213000	25
Стенка	310	390	205000	24

На рис.1 показано вертикальное смещение испытанных образцов в середине пролета в зависимости от приложенной вертикальной нагрузки, полученной экспериментально.

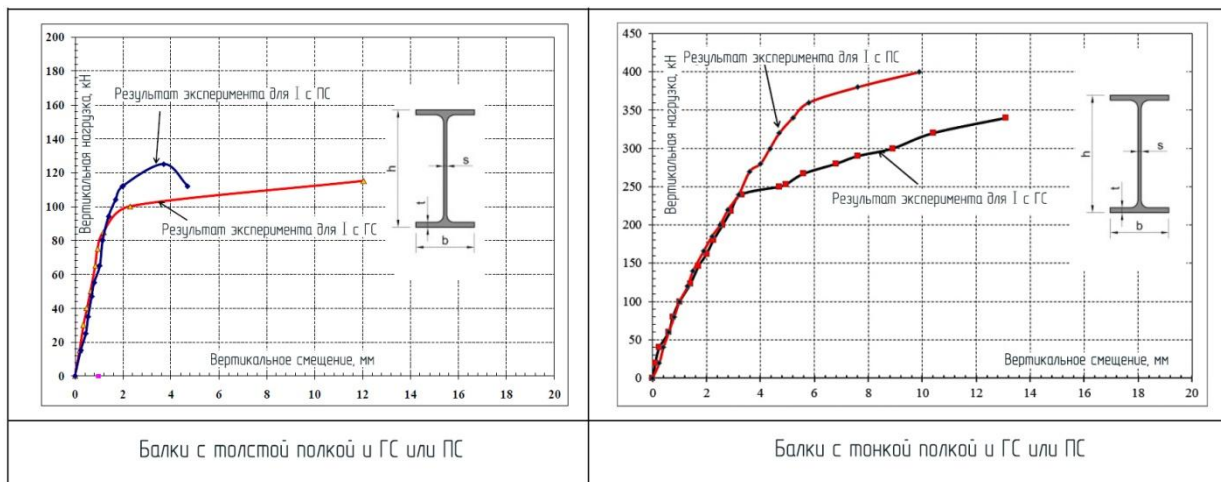


Рис. 1. – Кривые зависимости смещения от нагрузки в середине пролета

Проверка методом конечных элементов. Две модели были разработаны для испытания стальных балок с плоской или гофрированной стенкой при испытаниях на изгиб для прогнозирования влияния формы стенки на изгибную способность стальных балок (рис. 2).

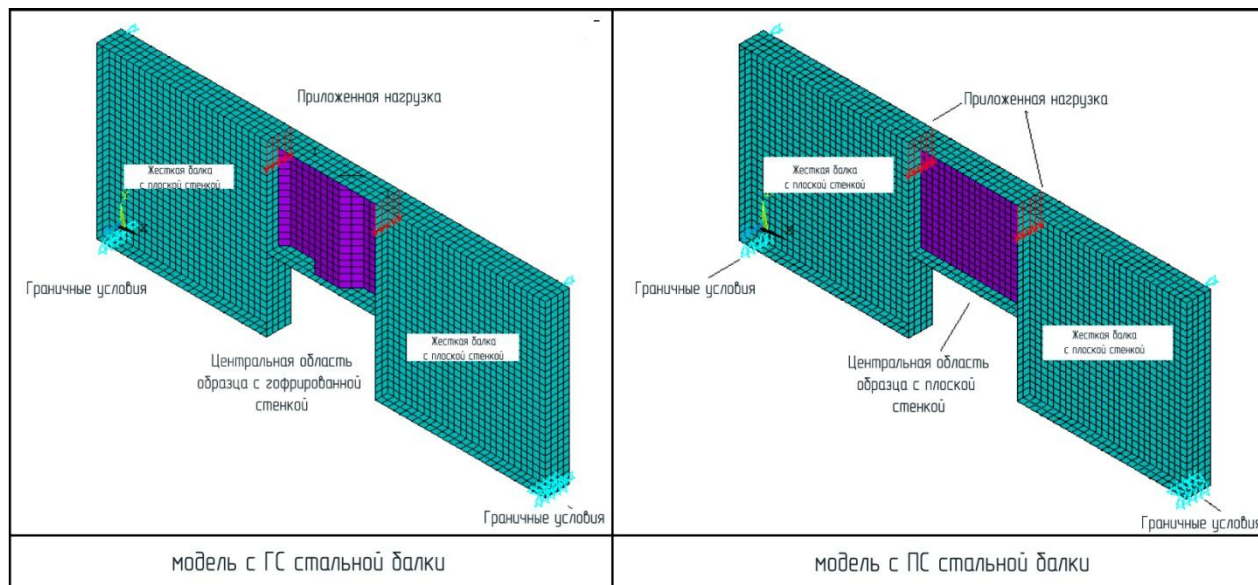
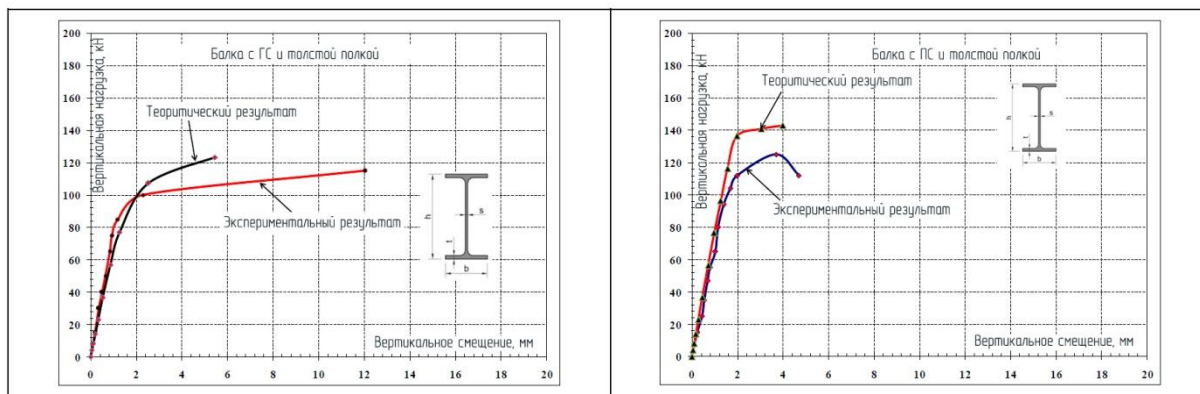


Рис. 2. – Конечно-элементная модель и граничные условия

Эта компоновка модели с различной конфигурацией стенки использовалась, чтобы показать взаимодействие изгиба и формы стенки.

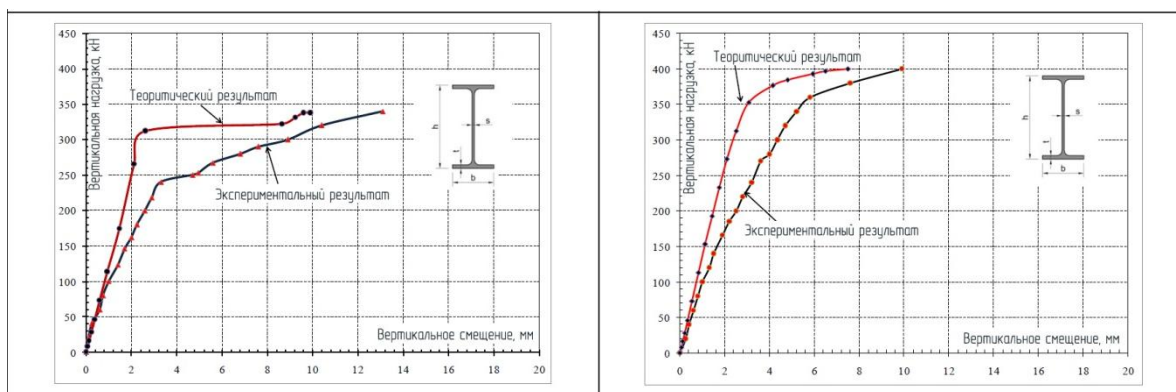
Модели были проверены по экспериментальным результатам, полученным, как показано на рис. 3 и рис. 4, с точки зрения вертикального смещения относительно приложенной нагрузки. На этих рисунках показано сравнение кривых нагрузки и вертикального смещения, полученных в результате испытаний и анализа методом конечных элементов, выполненного с помощью ANSYS. На рис. 3 показано сравнение общего поведения стальной балки с ГС или ПС и толстой полки, полученного в результате испытаний, и результатов, полученных с помощью ANSYS. На рис. 4 показано аналогичное сравнение нагрузки и вертикального смещения для стальных балок с тонкими полками.



Балка с гофрированной стенкой

Балка с плоской стенкой

Рис. 3. – Сравнение результатов для балок с толстой полкой



Балка с гофрированной стенкой

Балка с плоской стенкой

Рис. 4. – Сравнение результатов для балок с тонкой полкой

Выводы. Чтобы изучить влияние гофрированной стенки на изгибную способность стальных балок, было проведено проанализировано испытание с использованием обычных стальных двутавровых балок и сравнение со стальными балками с гофрированной стенкой. Экспериментальные работы выявили диапазон, в котором снизилась изгибная способность.

Результаты исследования показали следующее:

1. Изгибная способность стальной балки с гофрированной стенкой меньше, чем у обычной стальной двутавровой балки, в диапазоне от 10 до 20%.

2. Изгиб стальной балки с плоской стенкой показал местный продольный изгиб полки с последующим локальным продольным изгибом стенки, в отличие от стальной балки с гофрированной стенкой, у которой ранее проявлялся только местный изгиб полки.

3. Модель конечных элементов может моделировать поведение стальных балок, особенно на упругой стадии, с приемлемой степенью точности.

Литература

1. Elgaaly M., Hamilton R.W., Seshadri A. Shear Strength of Beams with Corrugated Webs // Journal of Structural Engineering. 1996. Vol. 122. №4. pp. 390-398.

2. Huang L., Nikosaka H., Komine K. Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges // Computers and structures. 2004. Vol. 82. pp. 2061-2069.

3. Беляев В.Ф. Об оптимальной ориентации закрытых гофров в стенке стальной двутавровой балки // Промышленное строительство. 1990. №10. С. 20-21.



4. Ажермачев Г.А. Балки с волнистыми стенками // Промышленное строительство. 1963. С. 54-56.

5. Лавыгин Д.С., Леонтьев В.Л. Алгоритм смешанного метода конечных элементов решения задач теории стержней // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910

6. Лукин А.О. Определение прогибов балок с гофрированной стенкой с учетом сдвиговых деформаций // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1496

7. Лихтарников Я. М. Вариативное проектирование и оптимизация стальных конструкций. М: Стройиздат, 1979. 319 с.

8. Ahmed S. E., Amr B. S., Mamdooh A. Effect of corrugated web on flexural capacity of steel beams // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 4. pp. 470-481.

9. Металлические конструкции. Стальные конструкции зданий и сооружений: справочник проектировщика в 3-х т. / Под общ. ред. Кузнецова В. В. М.: Изд-во АСВ, 1998. Т.2. 512 с.

10. Максимов Ю.С., Остриков Г.М., Долинский В.В. Устойчивость гофрированных стенок двутавровых балок // Строительная механика и расчет сооружений. 1985. №6. С. 43-45.

References

1. Elgaaly M., Hamilton R.W., Seshadri A. Journal of Structural Engineering. 1996. Vol. 122. №4. pp. 390-398.

2. Huang L., Hikosaka H., Komine K. Computers and structures. 2004. Vol. 82. pp. 2061-2069.

3. Belyaev V.F. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1990. №10. pp. 20-21.

4. Azhermachev G.A. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1963. pp. 54-56.

5. Lavygin D.S., Leont'ev V.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910



6. Lukin A.O. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1496
7. Likhtarnikov Ya. M. Variativnoe proektirovanie i optimizatsiya stal'nykh konstruktsiy. [Variable design and optimization of steel structures]. Moskva, 1979. 319 p.
8. Ahmed S. E., Amr B. S., Mamdooh A. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 4. pp. 470-481.
9. Metallicheskie konstruktsii. Stal'nye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy: spravochnik proektirovshchika v 3-kh t. [Metal structures. Steel structures of buildings and erections: civil designer reference]. Pod obshch. red. V. V. Kuznetsova. Moskva, 1998. v.2. 512 p.
10. Maksimov Ju.S., Ostrikov G.M., Dolinskij V.V. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. 1985. №6. pp. 43-45.