

УДК 69

Николаев Валентин Владимирович, магистрант,
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАКЛОННЫХ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ В СТАЛЬНЫХ БАЛКАХ С ГИБКОЙ СТЕНКОЙ INVESTIGATION OF THE USE OF INCLINED STIFFENERS IN STEEL I-BEAM WELDED BEAMS

Аннотация: в статье рассматривается влияние наклонного расположения ребер жесткости в стальной балке с гибкой стенкой. Установка наклонных ребер жесткости повышает несущую способность балки. Проведены сравнительные расчеты балки с гибкой стенкой в ПК ANSYS с вертикальными ребрами жесткости и наклонными ребрами жесткости.

Abstract: The article examines the influence of the inclined arrangement of stiffeners in a steel beam with a flexible wall. Installing inclined stiffeners increases the load-bearing capacity of the beam. Comparative calculations of a beam with a flexible wall were carried out in ANSYS with vertical stiffeners and inclined stiffeners.

Ключевые слова: ребро жесткости, наклонные ребра, устойчивость стенки, балка с гибкой стенкой.

Keywords: stiffener, inclined ribs, wall stability, beam with a flexible wall.

Введение

Переход к новым технологиям, совершенствование конструктивных решений позволяют создавать оригинальные и более экономичные конструкции, обеспечивающие необходимую прочность и надежность. К таким конструкциям, несомненно, относятся балки с гибкой стенкой (БГС) [2].

Рациональность распределения материала заключается в применении тонколистовой стали для стенок таких балок. В основном БГС представляют собой двутавровые стальные балки с высокой стенкой, подкрепленной поперечными ребрами жесткости (РЖ) или выполненные без подкрепления промежуточными ребрами жесткости с сохранением только спаренных ребер в районе опор. При нагружении таких балок, их полки сопротивляются изгибающему моменту, в то время как стенка – сдвигу.

БГС в процессе эксплуатации может потерять устойчивость по двум причинам, при нагружении балки равномерно распределенной нагрузкой q от сдвига (потеря устойчивости стенки в районе опор, вызванная действием касательных напряжений от поперечной силы) или при действии на балку сосредоточенной силы F от изгиба (потеря устойчивости стенки балки от нормальных напряжений при изгибе в центральной части).

Что бы повысить устойчивость БГС, Притыкин А.И. в своей работе «Местная устойчивость балок с гибкой стенкой и способы ее повышения» [3], предлагает различные конструктивные решения в зависимости от причины потери устойчивости.

При потере устойчивости от изгиба для увеличения критической нагрузки можно применить:

- увеличение площади поясов;
- установка продольных ребер жесткости;
- выполнение вырезов в зоне потери устойчивости стенки.

При потере устойчивости от сдвига повысить критическую нагрузку:

- установка наклонных РЖ;



- установка поперечных РЖ;
- выполнение вырезов в зоне возможной потери устойчивости стенки.

В данной статье рассмотрим эффективность варианта повышения устойчивости БГС с помощью установки наклонных РЖ.

Так же Притыкин А.И. в своей работе [3] предлагает для определения критерия смены форм потери устойчивости определять коэффициент k_ϕ .

Для случая нагружения шарнирно опертой балки равномерно распределенной нагрузкой

$$k_\phi = 21,6 (\beta + 0,167)/\xi \quad (1)$$

Критерий формы для сосредоточенной силы

$$k_\phi = 10,8 (\beta + 0,167)/\xi$$

$k_\phi > 1$ потеря устойчивости от сдвига

$k_\phi < 1$ потеря устойчивости от изгиба

где β – гибкость стенки;

Для более эффективного повышения устойчивости БГС изучим работу «Прикладная механика твердого деформируемого тела» А.П. Филина [4] рассмотрим траектории главных напряжений в балке (рис.1).

В изотропном теле в каждой точке напряженно-деформированного тела направления главных напряжений и главных деформаций совпадают, траектории главных напряжений одновременно являются и траектории главных деформаций (рис.1).

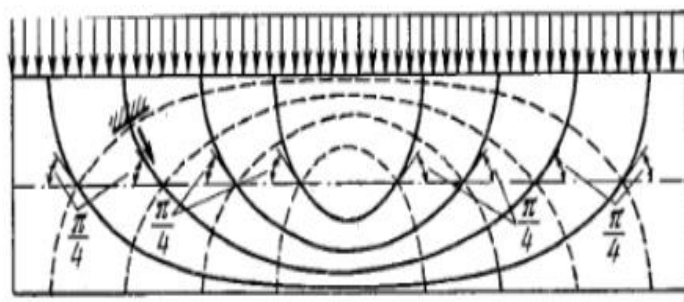


Рис. 1 Траектории главных напряжений в балке

Ребра жесткости наиболее эффективны при расположении по направлению траекторий главных сжимающих напряжений.

Из этого можно сделать вывод, что наклонные РЖ необходимо располагать «елочкой», что бы была работа на сжатие, т.е. относительно центра ребра наклонены во встречном направлении.

Исходя из изученных выше работ, делаем вывод, что исследование применения наклонных РЖ в БГС актуально и перспективно.

Материал и методы исследований

Киселев В.Н. в своей работе «Экспериментальное исследование двутавровых сварных балок, подкрепленных наклонными ребрами жесткости, на плоский изгиб» [1] экспериментально исследовав различные вариации расположения наклонных РЖ делает важные для нас выводы:

- 1) Использование ребер, приваренных к стенке, снижало соответствующую поперечную сил в стенке на 70...80%;
- 2) за счет постановки противокрутильных связей увеличивается жесткость подкрепленных стержней. Прогибы могут быть снижены на 1,3...14,5%;



3) нормальные напряжения σ_x в опасном сечении могут быть снижены на 4,4...24,3% при увеличении общего веса конструкции на 1,8...13,3 %.

Так же важно отметить, что балка конфигурации Б-5 (рис.2) с наклонными ребрами жесткости угол наклона 45 градусов, имела, по результатам исследования (Таблица 1), наибольшую жесткость.

Из работы [1] для отметим применительно для нашего исследования, что наиболее эффективный угол наклона РЖ это 45° .

Таблица 1

Значения коэффициента изменения изгибной жесткости
стержня, полученные за счет постановки наклонных ребер жесткости

Определя- емый параметр	Б-1	Б-2	Б-4	Б-5	Б-6	Б-7	Б-8	Б-11	Б-12
V	1.00	1.000	1.095	1.015	1.038	1.052	1.013	1.054	1.030
σ_x	2160	-	1943	1635	1946	1743	2000	1740	2064

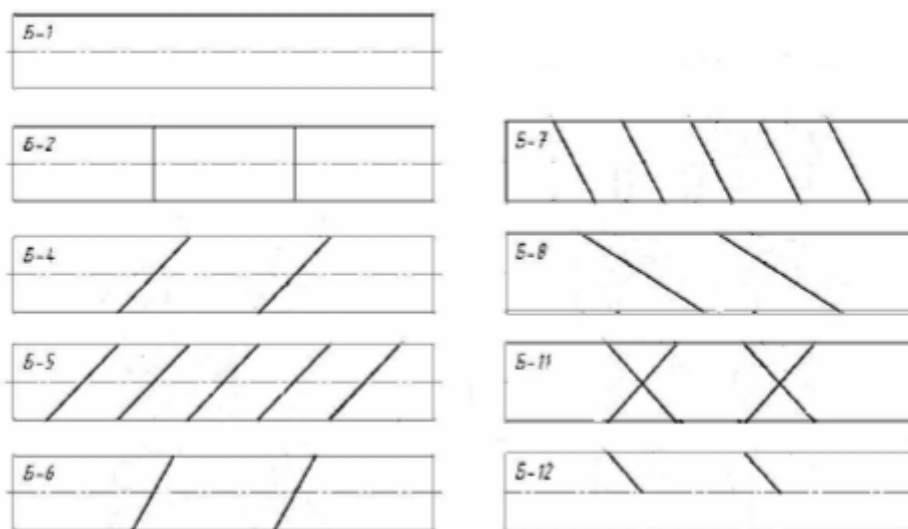


Рис. 2 Модели исследуемых сварных однопролетных шарнирноопертых балок.

Кириллов И.Е. в своей работе «Совершенствование расчетных зависимостей для оценки местной устойчивости стальных балок с гибкой стенкой при разных конструктивных решениях» [2] установил, что при оценке устойчивости моделей БГС 260-60-0,19-12-0,6 мм (рис. 3) выяснялось влияние на устойчивость наклонных ребер. Расчет МКЭ модели без наклонных РЖ (рис.3,а) показал, что величина $F_{cr}=370,133$ Н, а устойчивость теряют отсеки в центральной части балки. Установка наклонных ребер только в центральных (рис. 3,б) или только в концевых отсеках (рис. 3,в) незначительно повышает устойчивость БГС до $F_{cr}=379,331$ Н. Лишь наличие наклонных ребер во всех отсеках (рис. 3,г) ведет к росту F_{cr} в 1,8 раза.

Влияние наклонных РЖ на устойчивость стальных БГС

Идея применения наклонных ребер жесткости заключается в том, чтобы изменить форму выпучины в пределах отсека БГС и тем самым повысить устойчивость балки.

Важно расположение ребра по отношению к диагональной выпучине, образующейся при потере устойчивости неподкрепленного отсека. Если наклонное ребро пересекает



выпучину поперек, как это показано на рисунке 4, т. е. направление его совпадает с линией действия главных сжимающих напряжений, то эффект подкрепления может быть почти двукратным.

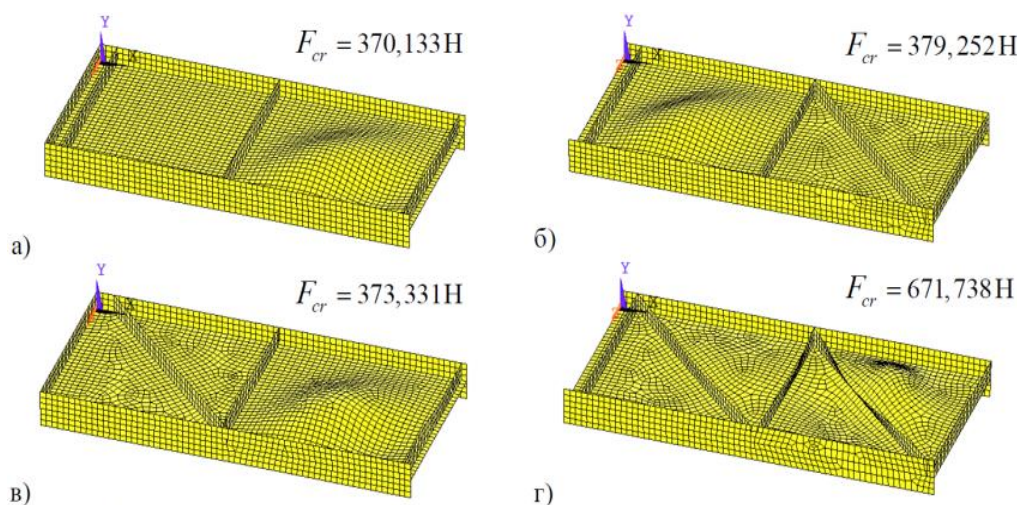


Рис. 3 Модели балок: а) без наклонных РЖ; б) наклонные ребра только в центральных отсеках; в) наклонные ребра только в концевых отсеках; г) наклонные ребра во всех отсеках.

т. е. направление его совпадает с линией действия главных сжимающих напряжений, то эффект подкрепления может быть почти двукратным. Если же ребра жесткости направлены вдоль линии растягивающих напряжений, то наличие их повышает устойчивость стенки незначительно – примерно на 10%.

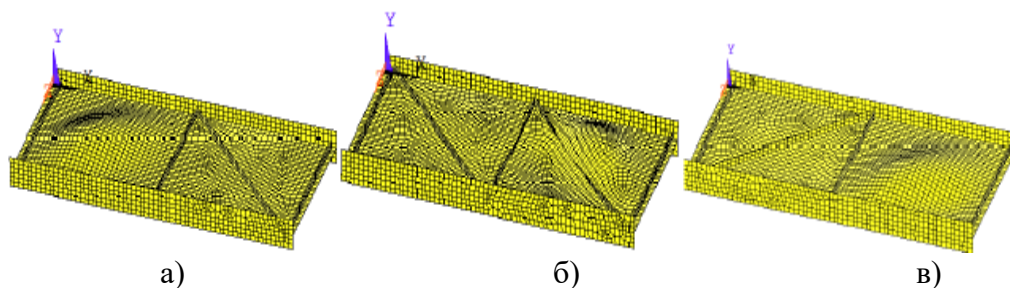


Рис. 4 Модели балок: а) выпучина без наклонных РЖ; б) наклонное ребро пересекает выпучину поперек; в) ребро жесткости направлено вдоль линии растягивающих напряжений.

По работе [2] следует отметить следующие выводы полезные в нашем исследовании:

1. Необходима установка наклонных РЖ по всей длине балки.
2. Расположение ребра по отношению к диагональной выпучине должно совпадать с линией действия главных сжимающих напряжений, образующейся при потере устойчивости. Ребро должно пересекать выпучину поперек.

Результаты и проблематика

Учитывая выводы ранее проведенных исследовательских работ [1,2,3,4], с целью детального изучения работы балки с гибкой стенкой подкрепленных наклонными ребрами жесткости, рассмотрим расчетные модели рисунок 5 а, б.

По расчету сравниваем стандартную балку с вертикальными РЖ (рис. 5а) согласно работы общепринятая методика проектирования и предлагаемая нами, БГС тех же размеров с наклонными РЖ (рис.5б).



Мы будем исследовать шарнирно опертую балку равномерно распределенной нагрузкой [7].

Длина балки $l = 16000$ мм; высота балки $H = 1600$ мм; ширина полки $b_f = 560$ мм; толщина полки $t_f = 30$ мм; толщина стенки $t_w = 10$ мм; высота стенки $h_w = 1540$ мм

Согласно работы [3] определим по какой форме будет происходить местная потеря устойчивости БГС, до применения наклонных ребер жесткости.

Для случая нагружения шарнирно опертой балки равномерно распределенной нагрузкой коэффициент определения критерия смены форм потери устойчивости определяем по формуле 1.

$$k_{\phi} = 21,6 (\beta + 0,167) / \xi \quad (1)$$

где $\beta = b_f t_f / H t_w$;

$\xi = l / h_w$;

$\beta = 560 \times 30 / 1600 \times 10 = 105$ мм;

$\xi = 16000 / 1540 = 10,4$ мм;

$$k_{\phi} = 21,6 (105 + 0,167) / 10,4 = 218,4$$

$k_{\phi} > 1$, следовательно должна быть потеря устойчивости от сдвига.

В качестве основного инструмента для исследования был принят метод конечных элементов, реализованный в программе ANSYS.

Рассматривается стальная балка двутаврового сечения.

Класс стали С245, соединение шарнирное.

В расчете рассматриваем 2 модели балок см. рис.5. Балка а) – это стандартный вариант как принято в действующих нормативах [4, 6] проектировать металлические балки и подкреплять вертикальными РЖ. Балка б) это вариант предлагаемый нами с применением выводов изученных работ [1,2,3,4], а именно:

- необходимость установка наклонных РЖ по всей длине балки согласно работы [2];
- наклонные РЖ необходимо располагать «елочкой», что бы была работа на сжатие согласно работы [4];
- наиболее эффективный угол наклона РЖ это 45^0 согласно работы [1];
- ребро должно пересекать выпучину поперек, т.е. совпадать с линией действия главных сжимающих напряжений согласно работы [2].

После проведения расчета анализируем эпюры. По эпюрам нормального напряжения и запаса прочности (рис. 6) видим, что после установки наклонных РЖ происходит более равномерное распределение напряжения по длине балки (по нижнему и верхнему поясам).

Также произошел переход от формы потери устойчивости – сдвиг к форме потери устойчивости – изгиб.

Произошло укрепление опорных зон, где ожидалась потеря устойчивости стенки, вызванная действием касательных напряжений от поперечной силы, из-за чего происходит переход к потери устойчивости стенки балки от нормальных напряжений при изгибе в центральной части – выпучивание от сжатия (видно по эпюре запаса прочности).

Выполним анализ результатов по таблице 2:

Масса балки с наклонными РЖ увеличилась на 251,5 кг, это 4% относительно балки с вертикальными РЖ.



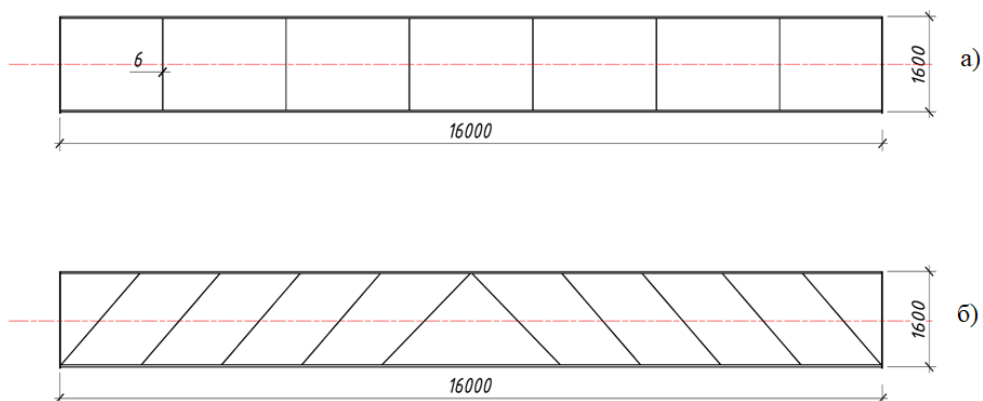


Рис. 5 Расчетные модели. а) балка с вертикальными РЖ;
б) балка с наклонными РЖ.

Таблица 2

Результаты расчета БГС

Вид балки	Масса, кг	Несущая способность, Па
Балка с вертикальными РЖ (рис. 5а)	6457	150 000
Балка с наклонными РЖ (рис.5б)	6708,5	290 000

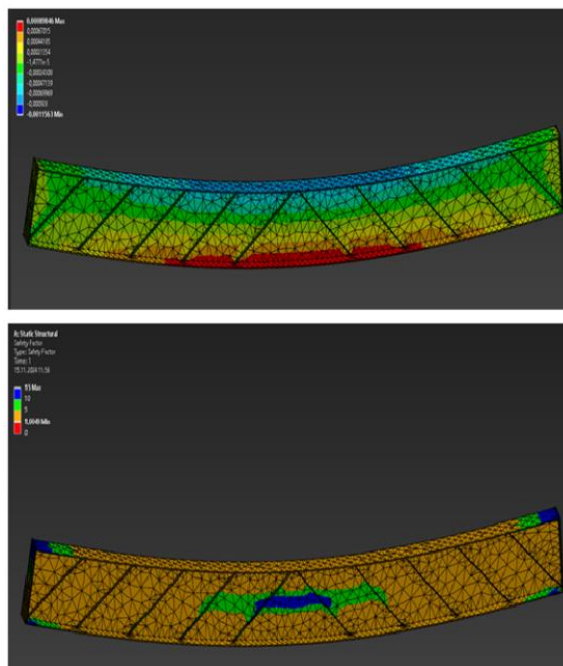


Рис. 6. эпюры: а) нормального напряжения; б) запаса прочности.

Несущая способность балки с наклонными РЖ увеличилась на 140.000 Па это на 93% относительно балки с вертикальными РЖ.

Эти показатели подтверждают гипотезу, что применение наклонных РЖ повышает устойчивость БГС и несущую способность.

Заключение

Исходя из результатов проведенного исследования делаем вывод, что наклонное расположение ребер жесткости в БГС привело к повышению несущей способности на 93% при



увеличении массы балки на 4%. Так же подтверждается, что оптимальный угла наклона ребер жесткости 45^0 и что ребра жесткости необходимы по всей протяженности балки. После установки наклонных РЖ происходит более равномерное распределение напряжения по длине балки (по нижнему и верхнему поясам).

Список литературы:

1. Киселев, В. Н. Экспериментальное исследование двутавровых сварных балок, подкрепленных наклонными ребрами жесткости, на плоский изгиб / В. Н. Киселев, И. Г. Целуйко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 21-26. – EDN TPKRAD.
2. Кириллов, И. Е. Совершенствование расчетных зависимостей для оценки местной устойчивости стальных балок с гибкой стенкой при разных конструктивных решениях: специальность 21.10.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кириллов Илья Евгеньевич, 2022. – 160 с. – EDN JFDTBM.
3. Притыкин, А. И. Местная устойчивость балок с гибкой стенкой и способы ее повышения / А. И. Притыкин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 4 (243). – С. 25-31.
4. Филин, Анатолий Петрович Прикладная механика твердого деформируемого тела: Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строит. механики / А. П. Филин. – М.: Наука. – 22 см. Т. 3. – Москва: Наука, 1981. – 480 с.: ил.

