

УДК 624.014.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАПЕЦИЕВИДНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ

А.А. ИВАНОВ; О.П. ИВАНОВА
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается поведение стенки двутавровой балки, подкрепленной ребрами жесткости с различными углами наклона. Представлены результаты расчета устойчивости пластин в линейной постановке. Вычислены коэффициенты устойчивости для пластин различных геометрических параметров, проведен анализ эффективности наклона ребер жесткости с точки зрения устойчивости отсеков, находящихся в условии чистого изгиба.

Ключевые слова: выпучивание, изгиб, метод конечных элементов, устойчивость, испытания пластин, критическое напряжение.

В специальной литературе опубликовано незначительное количество работ теоретического [1–3; 5] и экспериментального [4; 6; 7] характера, в которых авторы рассматривают вопрос о работе стальных неразрезных балок на плоский изгиб со стенками, усиленными наклонными ребрами жесткости. Основной недостаток этих экспериментальных исследований заключается в том, что они проводились на моделях с малыми геометрическими размерами ($L = 1500$ мм). Геометрические характеристики рассмотренных конструкций не допускали эффектов, связанных с потерей устойчивости отдельных элементов стержней. Отсутствие данных по сопротивлению выпучиванию пластин в балках с «противокрутильными связями» требует дальнейших исследований этого вопроса в области строительных конструкций.

При решении задач, связанных с *выпучиванием пластин*, известны три характерных случая:

- 1) вблизи опор наибольшее влияние оказывают касательные силы, а часть стенки, ограниченную ребрами жесткости и поясами, можно считать как пластину, подверженную действию равномерного сдвига;
- 2) посредине пролета касательными напряжениями можно пренебречь, в отличие от изгибных, так как эта часть стенки находится в условии чистого изгиба;
- 3) в промежуточных сечениях наблюдаются комбинации нормальных и касательных сил (рис. 1).

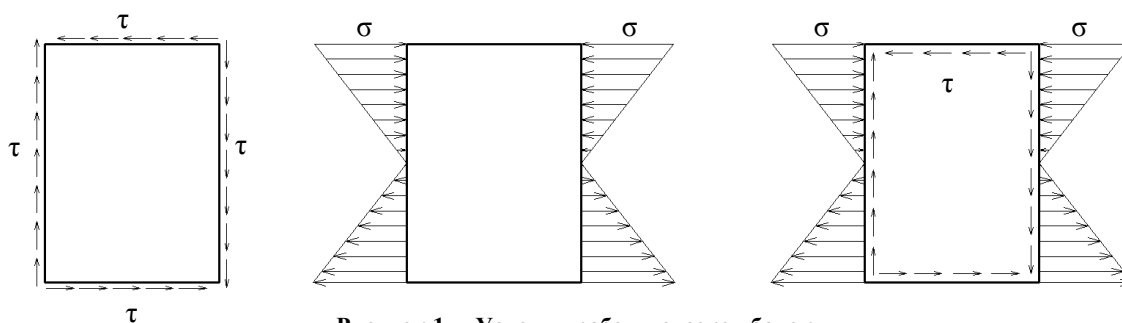


Рисунок 1. – Условия работы отсеков балок

Существует точное решение уравнения в частных производных с переменными коэффициентами для пластин, равномерно сжатых в поперечном направлении. Решение, выраженное через критические сжимающие напряжения, может быть представлено в следующем виде:

$$\sigma_{кр} = K_{\sigma} \frac{\pi^2 D}{b^2 h} = K_{\sigma} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \cdot \frac{h^2}{b^2}, \quad (1)$$

где K_{σ} – коэффициент, зависящий от отношения сторон пластины; E – модуль упругости материала; μ – коэффициент Пуассона; h и b – соответственно высота и ширина пластины.

Профессором С.П. Тимошенко [8] предложено постоянную составляющую из (1) включать в безразмерный коэффициент k (2):

$$\sigma_{кр} = k \frac{E \cdot h^2}{(1-\mu^2) \cdot b^2}. \quad (2)$$

Для расчета критических сжимающих напряжений пластин различных геометрических параметров решено использовать программные комплексы, позволяющие производить подобные расчеты. В качестве среды для расчета был выбран комплекс ANSYS 16.1 ACADEMIC. Геометрические параметры пластин

задавались параметрически так, чтобы их значения было легко изменить. В качестве конечного выбран элемент типа SHELL281. Основной переменной параметр, оказывающий наибольшее влияние на устойчивость пластин, – отношение высоты пластины к её толщине t . Также варьировались отношение высоты h пластин к их ширине b и угол наклона граней к горизонтали α (для пластин полигонального очертания) (рис. 2).

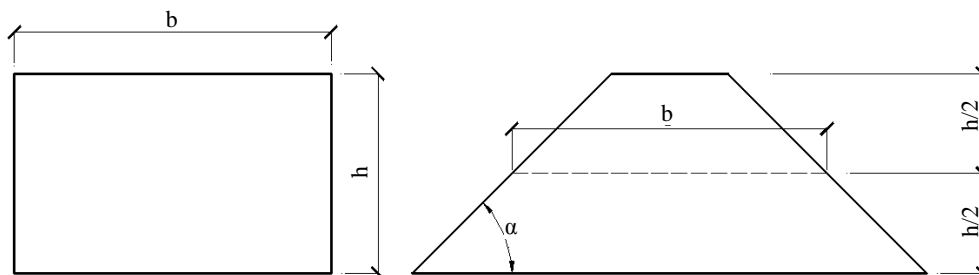


Рисунок 2. – К определению геометрических параметров пластин

Для исключения влияния размеров конечных элементов на результат статического расчета размер грани конечных элементов типа SHELL281 при разбиении пластин не превышал 10 мм, что при принятых размерах исследуемых пластин давало от 50 до 120 элементов на грань. Условия закрепления пластин создавались аналогично тем, в которых находятся отсеки балок с поясами и ребрами достаточной жесткости. В этом случае края пластины не могут вращаться, ограничены в перемещениях из плоскости стенки. Для соответствия условий работы стенок балок, находящихся в условии чистого изгиба, и исследуемых пластин нагружение производилось парой изгибающих моментов в 100 кН·м, приложенных к граням пластин.

В результате статического расчета контролировались максимальные нормальные сжимающие напряжения. Для определения нормальных напряжений сжатой части пластин в момент потери устойчивости использовался модуль Eigenvalue Buckling. По итогам его решения определялся минимальный положительный множитель нагрузки. Так как зависимость между величиной изгибающего момента и нормальными напряжениями прямо пропорциональная, нормальные напряжения потери устойчивости пластин не что иное, как произведение максимальных отрицательных нормальных напряжений от единичной силы на множитель нагрузки:

$$\sigma_{x,buck} = \sigma_{x,m} \cdot k_{lm}, \quad (3)$$

где $\sigma_{x,buck}$ – нормальное напряжение потери устойчивости; $\sigma_{x,m}$ – максимальное нормальное напряжение в пластине от действия изгибающего момента; k_{lm} – множитель нагрузки.

Принятые диапазоны размеров пластин представлены в таблице 1. В качестве характеристик материала рассмотрены $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, $f_y = 250$ МПа.

Таблица 1. – Принятые геометрические параметры пластин

Наименование	Принятые величины
Высота пластины (высота отсека балки) h_w	800, 1000, 1200 (мм)
Ширина пластины b (расстояние между поперечными ребрами жесткости, см. рис. 2)	600, 1000, 1400, 1600, 2000 (мм)
Толщина пластины t_w (толщина стенки балки)	4, 6, 8 (мм)
Угол наклона ребер жесткости к горизонтали α	90°, 75°, 60°, 45°

Так как полученные результаты в чистом виде не представляют особого интереса, для наглядности выразим их через коэффициент k из формулы (2). Подставив полученные в результате расчетов значения $\sigma_{x,buck}$ для пластин, получим данные, представленные в таблице 2.

Таблица 2. – Значения коэффициента k в уравнении (2)

b/h	0,75	1	1,17	1,25	1,33	1,4	1,6	1,75	2	2,5
$\alpha = 90^\circ$	40,5	37,67	36,58	36,31	36,06	35,6	34,8	34,56	34,04	33,49
$\alpha = 75^\circ$	50,52	42,36	38,3	36,93	36,11	35,45	34,79	34,41	33,83	33,21
$\alpha = 60^\circ$	–	–	41,84	40,07	39,09	37,5	34,69	34,26	33,32	32,54
$\alpha = 45^\circ$	–	–	–	–	51,39	45,18	37,44	36,32	32,61	32,19

Основываясь на полученных данных (табл. 2), проиллюстрируем зависимости коэффициента устойчивости пластин от отношения b/h .

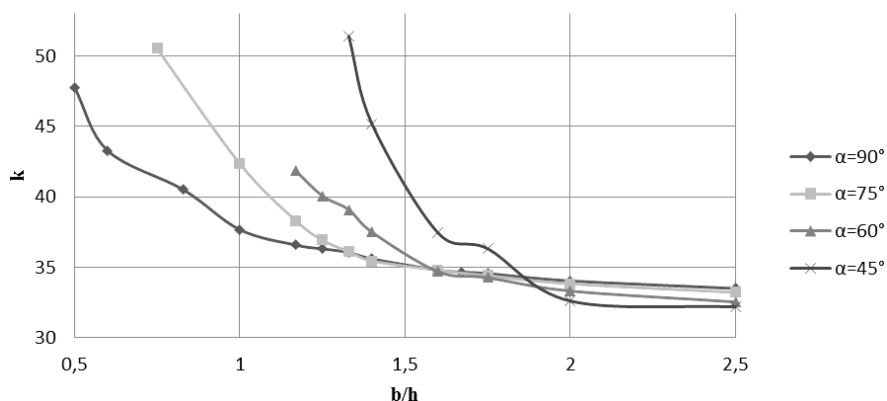


Рисунок 3. – Зависимости коэффициента устойчивости пластин от отношения b/h

Полученные результаты позволяют сделать следующие **выводы**:

1) характер потери устойчивости пластин при действии чистого изгиба для отсеков балок различной формы аналогичен. Потеря устойчивости сопровождается образованием полуолн, длина которых приблизительно равна $0,67h$;

2) как следует из графика (рис. 3), использование наклонных ребер жесткости с точки зрения повышения устойчивости пластин при действии чистого изгиба целесообразно в случае, если отношение b/h не более 1,3 для $\alpha = 75^\circ$; 1,6 – для $\alpha = 60^\circ$; 1,85 – для $\alpha = 45^\circ$. Однако существенно увеличить устойчивость пластин возможно только при использовании наклонных ребер при условии, что $b/h < 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аистов, Н.Н. Испытания сооружений / Н.Н. Аистов. – М. : Стройиздат, 1960.
2. Аксельрад, Э.Л. Техническая теория стержней : учеб. пособие / Э.Л. Аксельрад. – Л. : Ленингр. ин-т инженеров железнодорожного транспорта. – Л., 1967.
3. Артемов, П.Я. Расчет тонкостенных стержней открытого профиля / П.Я. Артемов, М.И. Любошин, М.Н. Рудицин. – Минск : Белорус. политехн. ин-т, 1959.
4. Баклашов, Г.Г. Экспериментальное исследование прочности и устойчивости подкрепленных тонкостенных стержней при плоском изгибе / Г.Г. Баклашов. // Изв. вузов, раздел «Строительство и архитектура». – 1973. – № 1.
5. Бейлин, Е.А. Об устойчивости плоской формы изгиба тонкостенных балок, имеющих упругие диафрагмы на торцах / Е.А. Бейлин // Инженерные конструкции, сопротивление материалов, строительная механика : сб. докл. XX науч. конф., Ленинград, 1962 г. : Ленингр. инженерно-строительный ин-т. – Л. : ЛИСИ, 1962.
6. Бирюлев, В.В. О работе стальных балок со стенками, усиленными наклонными ребрами жесткости / В.В. Бирюлев // Изв. вузов, раздел «Строительство и архитектура». – 1971. – № 9.
7. Болотин, Б.В. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития / Б.В. Болотин, И.И. Гельденблат, А.Ф. Смирнов. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1972.
8. Тимошенко, С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / С.П. Тимошенко // Избр. работы : под ред. Э.И. Григolloка. – М. : Наука, 1971. – 807 с.

Поступила 12.10.2016

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STABILITY OF TRAPEZOIDAL PLATES IN PURE BENDING

A. IVANOV, O. IVANOVA

This article describes the behavior of the I-beam walls reinforced by ribs with different angles of inclination. The results of calculation of stability of plates in the linear formulation. We calculate the stability coefficients for plates of different geometrical parameters, the analysis of the effectiveness of inclination of ribs in terms of sustainability compartments are provided in pure bending.

Keywords: buckling, bending, finite element method, sustainability, test plates, critical stress.