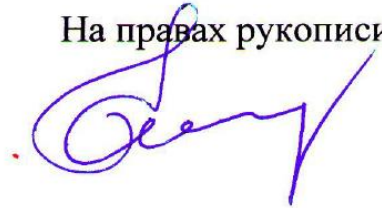


На правах рукописи



ЕМЕЛЬЯНОВ КОНСТАНТИН АНАТОЛЬЕВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ
ПЕРФОРИРОВАННЫХ БАЛОК С РОМБОВИДНЫМИ ВЫРЕЗАМИ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калининград – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент
Притыкин Алексей Игоревич

Официальные оппоненты: **Туснин Александр Романович**,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский московский
государственный строительный университет»
(ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»), проректор, профессор
кафедры «Металлические и деревянные
конструкции»

Соловьев Алексей Витальевич,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «Самгту»), заведующий
кафедрой «Металлические и деревянные
конструкции»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-петербургский государственный
архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ
ВО «Спбгасу»)

Защита состоится «23» декабря 2020 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительств», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д.6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А. А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д.6 и на сайте www.cstroy.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Перфорированные балки с шестиугольными вырезами находят широкое применение в различных сооружениях, начиная от подкрановых балок и кончая ригелями складов и балками перекрытий многоярусных автостоянок. В последние годы просматривается тенденция к широкому разнообразию конструктивного оформления балок с шестиугольной формой вырезом: наряду с классической перфорацией в виде вырезом правильной формы (Рисунок 1, а) применяется перфорация с уменьшенными габаритными размерами вырезом по длине, приводящая к ромбовидной их форме (Рисунок 1, б).



а)



б)

Рисунок 1— Балки с перфорацией: а) классической; б) ромбовидной

В последнем случае может варьироваться не только ширина перемычек, но и угол наклона сторон вырезом. Каждый вид конструктивного оформления имеет свои плюсы и минусы: более частое расположение ромбовидных вырезом приводит, с одной стороны, к сглаживанию изгибной жесткости балки, а с другой — к изменению ее напряженного состояния, а следовательно, прочности и устойчивости.

В тоже время расчетных зависимостей, позволяющих оценивать уровень напряжений в подобного рода балках или их устойчивость, пока нет. Поэтому исследование прочностных свойств, жесткости и устойчивости балок с ромбовидной формой вырезом представляется актуальным.

Степень разработанности темы. Применение перфорированных балок в строительстве насчитывает более 70 лет. Они широко применяются в США, Германии, России и других странах. Тем не менее, методы расчета таких балок до конца не разработаны из-за значительных математических сложностей. Львиная доля существующих методик определения напряженно-деформированного

состояния и устойчивости балок с перфорированной стенкой построена на аппроксимационных моделях, не дающих достаточной точности.

Вопросы прочности и местной устойчивости перфорированных балок рассматривались в работах В. В. Бирюлева, И. И. Ведякова, Я. И. Олькова, А. И. Складнева, А. И. Притыкина, М. М. Копытова, В. М. Добрачева, В. Г. Себешева, Р. Б. Митчина, Е. В. Литвинова, В. В. Филатова и др.

За рубежом направление балок с перфорацией исследовалось в работах R. G. Redwood, D. Darwin, W. K. Lucas, T. E. Gibson, B. S. Jenkins, N. J. Gardner, M. Hrabok, C. Ling, A. A. Aglan, O. Blodgett, W. Kanning, P. Wang, K. F. Chung, A. M. Jamadar и др.

Несмотря на все возрастающее количество исследований перфорированных балок, в отечественных и зарубежных стандартах нет пока зависимостей для прогнозирования напряженного состояния или устойчивости таких балок. Чаще всего рекомендации сводятся к введению поправочных множителей, что, конечно же, не отражает реального характера их условий работы. В Британском стандарте BS 5950-1:2000 оценку местной устойчивости перемычек балок с круглыми вырезами рекомендуется производить упрощенно как сжатой условной полосы с числовым коэффициентом, определяемым по кривой устойчивости в зависимости от ее гибкости. Вышеперечисленные факты подтверждают, что методы расчетов балок с перфорацией требуют доработки и совершенствования.

Научно-техническая гипотеза состоит в предположении, что для ромбовидно перфорированной балки при постоянной высоте вырезов и неизменном угле наклона сторон ее изгибная жесткость, а также критическая нагрузка, соответствующая местной потере устойчивости стенки от сдвига, не зависят от относительной ширины перемычек.

Цель диссертационной работы – совершенствование методик расчета по оценке прочности, жесткости и устойчивости перфорированных балок с ромбовидными вырезами при поперечном и чистом изгибе.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- общий обзор имеющейся литературы касательно вопросов напряжения, деформации и устойчивости перфорированных балок;
- анализ напряженно-деформированного состояния балок с ромбовидной перфорацией стенки и оценка влияния параметров перфорации на уровень концентрации напряжений;
- формирование алгоритма определения прогибов балок с ромбовидными вырезами при поперечном изгибе на основе теории составных стержней;
- исследование вопроса устойчивости стенок перфорированных балок с ромбовидными вырезами и выявление причины местной потери устойчивости перемычек;
- разработка технологии изготовления моделей перфорированных балок;
- разработка на языке ANSYS программы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости двутавровых балок с ромбовидными вырезами (БРВ) при разных видах нагружения.

Объектом исследования являются балки с ромбовидной перфорацией с варьируемой шириной перемычек, высотой вырезов и углом наклона сторон.

Предметом исследования являются изгибная жесткость, напряженное состояние и критические нагрузки, соответствующие местной потере устойчивости стенок в зависимости от конструктивного оформления балки и вида действующей на нее нагрузки.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- предложены дополнения и развитие методик расчета по оценке прочности, жесткости и устойчивости перфорированных балок с ромбовидными вырезами;
- выявлены преимущества в работе балок с ромбовидными вырезами относительно балок с шестиугольными вырезами правильной формы;
- установлено, что при чистом изгибе коэффициент концентрации напряжений по Мизесу в перфорированных балках с ромбовидными вырезами зависит линейно от относительной высоты вырезов;

- установлены закономерности потери местной устойчивости перемычек в балках с ромбовидными вырезами;
- предложена удобная для практических вычислений зависимость, позволяющая определять прогибы перфорированных балок с ромбовидными вырезами с высокой точностью.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что:

- установлены закономерности влияния параметров перфорации на прогибы и местную устойчивость балок;
- получена оценка максимальных величин и концентрации напряжений вблизи ромбовидных вырезов в зависимости от параметров перфорации при заданном радиусе скругления углов;
- выявлено, что при поперечном изгибе ромбовидная перфорация снижает уровень концентрации напряжений по сравнению с шестиугольными вырезами правильной формы.

Практическое значение работы:

- разработана на языке ANSYS программа расчета НДС и устойчивости двутавровых БРВ методом конечных элементов;
- получены новые зависимости для оценки прочности, жесткости и устойчивости балок с ромбовидной перфорацией стенки;
- разработана технология изготовления моделей перфорированных балок.

Методология и методы исследования. В работе применены методы теоретического и эмпирического исследования. Совершенствование методик расчета построено на основе общепринятых методов строительной механики и теории составных стержней. Численные исследования были выполнены с использованием сертифицированных программных комплексов. Экспериментальные исследования проводились на натурных конструкциях и маломасштабных моделях. Точность результатов оценивалась путем сравнения данных, полученных методом конечных элементов, с экспериментальными данными.

Личный вклад автора:

- выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований устойчивости и напряженного состояния перфорированных балок;
- разработана компьютерная программа создания расчетных моделей балок с ромбовидными вырезами, выполнены расчеты МКЭ их напряженно-деформированного состояния и устойчивости, проведен анализ полученных результатов;
- проведены экспериментальные исследования местной устойчивости натурных конструкций и маломасштабных моделей из жести БРВ при поперечном изгибе;
- разработана зависимость для оценки касательных напряжений в перемычке балки с ромбовидной перфорацией;
- разработана зависимость для оценки критической нагрузки БРВ при действии сосредоточенной силы;
- разработаны зависимости для оценки прогибов шарнирно опертой БРВ при произвольной нагрузке.

Положения, выносимые на защиту:

- решение задачи о распределении и концентрации напряжений в перфорированных балках с ромбовидными вырезами при совместном действии поперечной силы и изгибающего момента;
- метод расчета прогибов перфорированных балок с ромбовидными вырезами на основе теории составных стержней;
- решение задачи местной устойчивости балок с ромбовидной перфорацией при деформации сдвига в упругой стадии нагружения;
- технология изготовления моделей перфорированных балок.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным согласованием их с данными экспериментальных исследований на натурных конструкциях и маломасштабных моделях, а также с результатами расчетов МКЭ.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: международной НТК «Наука и техника: отклики сегодня» - 2013 (г. Киев); международных конференциях «Mechanika-2013», «Mechanika-2014», (г. Каунас, Литва); на VI Международном Балтийском морском форуме - 2018, (г. Калининград); на международной конференции «Construction and Architecture: theory and practice of industry development- 2018» (г. Нальчик); на 76-ой Всероссийской научно-технической конференции «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» - 2019 (г. Самара, АСА СамГТУ).

Внедрение результатов работы. Результаты исследований внедрены:

- в проекте торгового центра Saliena Outlet (Латвия), разработанного компанией ООО ЛИТАНА (г. Калининград);
- в процесс подготовки бакалавров ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта» по направлению 08.03.01 – Строительство.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 13-ти научных работах по теме диссертации, из них в ведущих рецензируемых ВАК изданиях – 2 (1,85 печатных листов, из них 1,05 выполнены лично автором). Общий объем публикаций составляет 11,27 печатных листов, из них лично автором выполнены 5,4 печатных листа. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (103 наименования), приложения. Работа изложена на 164 страницах машинописного текста и приложения на 3 страницах, содержит 103 рисунка, 11 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации и определяется направление исследования, формулируется общая цель и научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному изучению перфорированных балок с разной формой вырезов, проведен анализ методов их расчета.

Из обзора следует, что диапазон конструктивных решений перфорированных балок весьма широк, он включает как разнообразие формы, так и относительные размеры самих вырезов. Выбрать оптимальные варианты среди большого разнообразия высот вырезов, ширины перемычек, углов наклона сторон можно лишь, проведя тщательный анализа влияния конструктивных элементов на прочность и устойчивость таких балок. Сюда необходимо включать не только параметры перфорации, но и размеры сечения.

Основным объектом исследования в работе являются балки с ромбовидными вырезами, поскольку именно они начинают широко внедряться сейчас на строительных площадках России и за рубежом, а прочностные характеристики их недостаточно изучены.

На основании выполненного обзора делается вывод о необходимости совершенствования методик расчета по оценке прочности, жесткости и устойчивости перфорированных балок с ромбовидными вырезами при поперечном и чистом изгибе и методов повышения их несущей способности.

В работе часть из поставленных задач решена аналитически, а часть с применением метода конечных элементов и подтверждена экспериментальными исследованиями на маломасштабных моделях и натурных конструкциях.

В второй главе было проведено комплексное исследование напряженного состояния стенок балок как в зонах перемычек, так и у контуров вырезов вблизи угловых точек. В отличие от балок со сплошной стенкой, где рассматриваются только две компоненты напряжений σ_x и τ_{xz} , в перфорированных балках существенной величины в районе наклонных кромок перемычек достигают и напряжения σ_z . Именно они вызывают кососимметричное сжатие кромок

перемычек и последующее их выпучивание при потере местной устойчивости стенки БРВ.

Исследование величин касательных напряжений τ_{zx} , влияющих как на прочность перемычек при сдвиге, так и на их устойчивость, производилось аналитически и численно с помощью МКЭ. Вначале определялось усилие сдвига T в перемычке на уровне ее нейтральной оси (Рисунок 2, б), исходя из условия равновесия, по известной зависимости

$$T = Vs/f, \quad (1)$$

где f - плечо равнодействующих продольных сил N_1 и N_2 (Рисунок 2, а); s – шаг вырезов (Рисунок 2, а); V – поперечная сила в районе перемычки.

Выражение для плеча f было получено в виде

$$f = 2I/(b_f t_f (H - t_f) + 0.25H^2 t_w ((1 - 2t_f/H)^2 - \beta^2)). \quad (2)$$

В соотношении (2) момент инерции I вычисляется по ослабленному вырезом сечению.

Среднее значение τ_ε в перемычке с учетом (1) и (2) можно вычислить как

$$\tau_\varepsilon = 2V(1 + \cos \vartheta / \varepsilon)/t_w f. \quad (3)$$

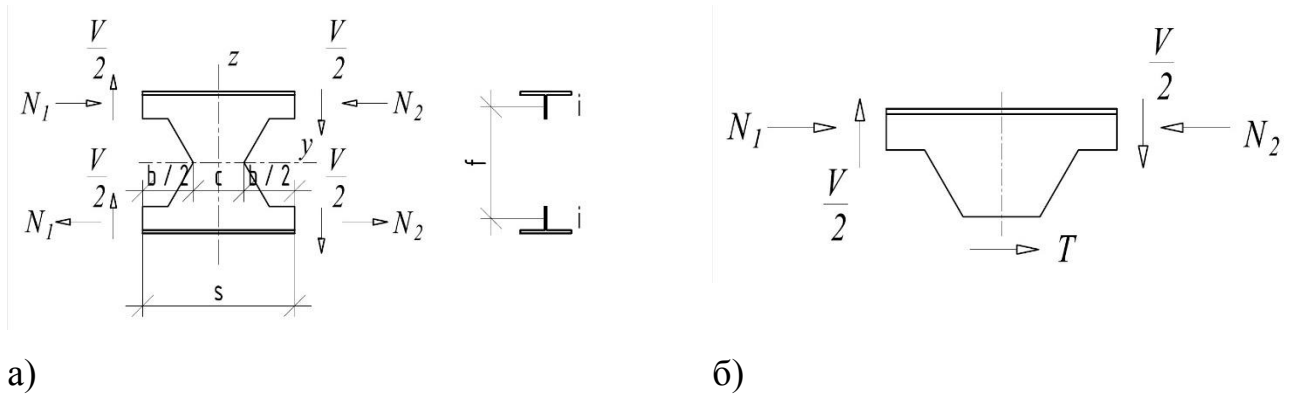


Рисунок 2 – Усилия в перфорированной балке с ромбовидными вырезами: а) в вертикальных сечениях; б) в горизонтальном сечении

Для обозначения размеров балки в работе использована следующая форма записи: $l - H - t_w - b_f - t_f - \beta - \varepsilon - \vartheta$, в которой l – длина балки, H – ее высота, t_w – толщина стенки, b_f – ширина полка, t_f – толщина полка, $\beta = h/H$ –

относительная высота вырезов, $\varepsilon = c/a$ – относительная ширина перемычки (a – наклонная сторона выреза), ϑ – угол наклона стороны выреза к оси абсцисс

При малой величине изгибающего момента, судя по данным рисунка 3, касательные напряжения по ширине перемычки балки распределяются по параболическому закону с максимумом, приближающемся к середине. В зависимости от нагружения максимальное значение превышает среднее (3) в 1,08 – 1,5 раза.

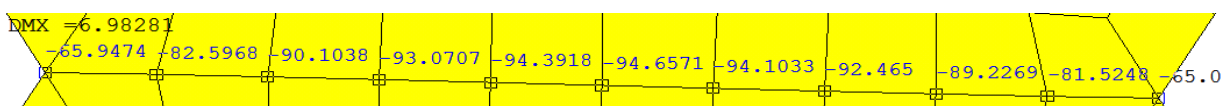


Рисунок 3 – Касательные напряжения τ_ε в перемычке балки размерами 1080-90-1,2-19-1,78см-0,667-0,8-60°, нагруженной сосредоточенной силой $P = 10\text{кН}$, МПа

Зависимость для эквивалентных напряжений по Мизесу $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ вблизи контура произвольного n -го выреза при нагружении шарнирно опертой БРВ сосредоточенной силой при фиксированном радиусе скругления углов была получена в виде

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = (\alpha_V + \alpha_M \frac{(n-1)(\cos \vartheta + \varepsilon)\beta}{(b_f t_f / H t_w + 0,167) \sin \vartheta}) \frac{V}{H t_w}, \quad (4)$$

где числовые коэффициенты α_V и α_M , зависящие от параметров перфорации, определяются из результатов расчета МКЭ. Для частного случая $\vartheta = 60^\circ$; $r = 0,06h$ зависимость (4) примет вид

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = (25,1 + 1,07 \frac{(n-1)(1+2\varepsilon)\beta}{b_f t_f / H t_w + 0,167}) \frac{V}{H t_w}. \quad (5)$$

Числовой коэффициент α_M при разных параметрах β и ε практически остается постоянным, а коэффициент α_V при $\beta = 0,667$ является линейной функцией от ε

$$\alpha_V = 23\varepsilon + 11,3. \quad (6)$$

Соотношение (4) применимо для вариантов нагружения БРВ с постоянной поперечной силой и линейным изменением момента.

Распределение $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ вблизи контура произвольного выреза (Рисунок 4) при постоянстве силы V подтверждает их линейный характер.

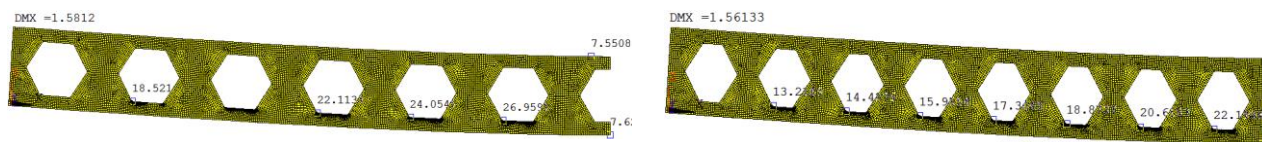
а) $\varepsilon=1$; $r = 0,06h$ б) $\varepsilon=0,6$; $r = 0,06h$

Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{max}^{экв}$ в шарнирно опертой балке размерами 1350-90-1,2-19-1,78см-0,667-ε-60°, нагруженной сосредоточенной силой $P=10$ кН, МПа

Как видно из рисунка 4, при поперечном изгибе уменьшение относительной ширины перемычек с $\varepsilon=1$ (Рисунок 4, а) до $\varepsilon=0,6$ (Рисунок 4, б) при одном и том же радиусе скругления углов не только не ухудшает напряженного состояния балки, но даже несколько улучшает его за счет ослабления негативного влияния изгиба тавровых поясов в пределах ширины выреза. Это приводит к снижению уровня напряжений в районе вырезов примерно на 20%.

Располагая величиной нормальных напряжений в полке балки со сплошной стенкой σ_{max}^{TT} и напряжениями в перфорированной балке $\sigma_{max}^{экв}$, вычисленными по (4), можно оценить величину коэффициента концентрации напряжений α_σ в перфорированной балке как

$$\alpha_\sigma = \sigma_{max}^{экв} / \sigma_{max}^{TT}. \quad (7)$$

Так, для балки с параметрами 1350-90-1,2-19-1,78см-0,667-0,6-60° (Рисунок 4, б), нагруженной сосредоточенной силой $P=10$ кН, получим по (7) $\alpha_\sigma = 22,1/7,74 = 2,86$.

В отличие от поперечного изгиба напряжение при чистом изгибе вблизи всех вырезов остается постоянным и его величину при фиксированном значении относительной ширины перемычки ε можно определить по зависимости

$$\sigma_{max}^{экв} = \alpha_\sigma^{ч.и} \sigma_{max}^{TT}, \quad (8)$$

где $\alpha_\sigma^{ч.и}$ - коэффициент концентрации напряжений при чистом изгибе.

На рисунке 5 показан уровень напряжений $\sigma_{max}^{экв}$ в балках с параметрами 1350-90-1,2-19-1,78см-β-0,6-60° с относительной высотой вырезов $\beta = 0,667$; 0,7;

0,73 и 0,75 и радиусе скругления $r = 0,06h$, из которого видно, что с увеличением β от 0,667 до 0,75 наблюдается рост $\alpha_{\sigma}^{ч.и.}$ примерно на 16% до значения 2,3. При этом зависимость $\alpha_{\sigma}^{ч.и.}$ от β носит линейный характер и в частном случае при $\varepsilon=0,6$ может быть представлена в виде

$$\alpha_{\sigma}^{ч.и.} = 3,86\beta - 0,645. \quad (9)$$

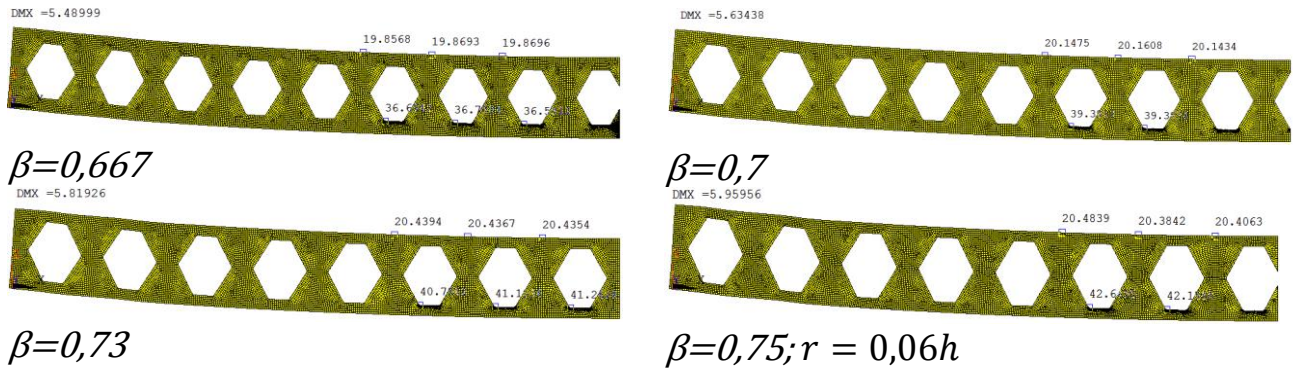


Рисунок 5– Эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{max}^{экв}$ в балке размерами 1350-90-1,2-19-1,78см- β -0,6-60° при чистом изгибе при разных значениях относительной высоты вырезов β , МПа.

В целом, как можно видеть из сравнения данных на рисунке 6, при постоянстве β уровень напряжений в районе вырезов при чистом изгибе слабо зависит от параметра перфорации ε (разница около 5%).

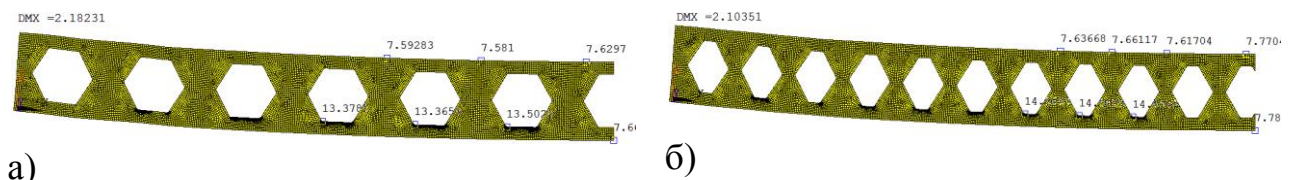


Рисунок 6 – Эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{max}^{экв}$ в балках размерами 1350-90-1,2-19-1,78см-0,667- ε -60° при чистом изгибе при разных значениях относительной ширины перемычек ε : а) $\varepsilon=1$; б) $\varepsilon=0,4$; МПа

Сравнение напряженного состояния балки с ромбовидными вырезами одинаковой высоты $\beta = 0,667$, но с разными параметрами ε , как при чистом (Рисунок 6), так и поперечном (Рисунок 4) изгибе с радиусом скругления углов $r = 0,06h$, показывает, что в случае чистого изгиба уровень α_{σ} меньше, чем при поперечном изгибе и составляет близкую к двум величину.

Таким образом, можно заключить (Рисунок 4), что при поперечном изгибе напряженное состояние при ромбовидной перфорации не только не хуже, но даже несколько лучше по сравнению с перфорацией шестиугольными вырезами правильной формы при тех же радиусах скругления углов.

В третьей главе исследуется деформированное состояние перфорированных балок с применением теории составных стержней, когда балка (Рисунок 7, а) рассматривается как состоящая из двух несущих Т-образных поясов, соединенных между собой упругим слоем, образованным перемычками (Рисунок 7, б).

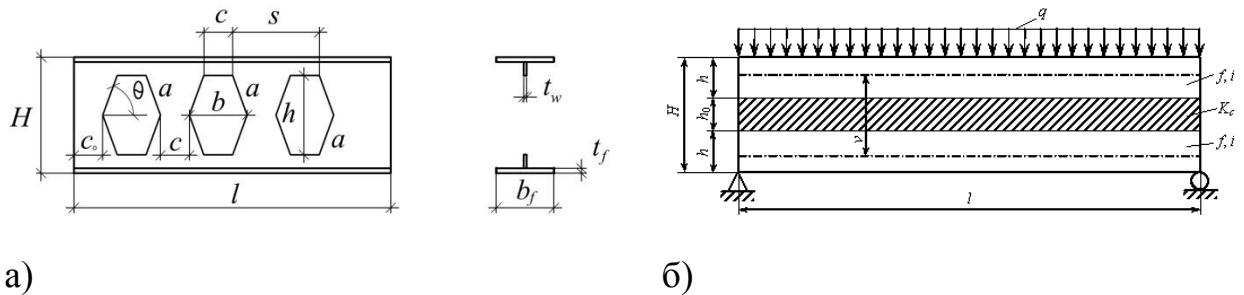


Рисунок 7 – Расчетная схема перфорированной балки: а) исходная модель; б) схема составного стержня.

Рассматривается деформация перфорированной балки с шестиугольными вырезами, имеющими укороченную горизонтальную сторону. Воспользовавшись подходом, изложенным ранее в работе А. И. Притыкина, решение задачи о прогибе шарнирно опертой перфорированной балки, нагруженной произвольной нагрузкой, по теории составных стержней было получено в виде

$$w_{перф} = w^{TT} (1 + I/2iK_c^*), \quad (10)$$

где w^{TT} - прогиб балки, вычисляемый по технической теории изгиба; K_c^* - безразмерный коэффициент, определяемый по зависимости

$$K_c^* = K_c l^2 I / E i A \pi^2. \quad (11)$$

Основная сложность решения задачи состоит в нахождении величины K_c - коэффициента жесткости упругого слоя, образованного перемычками. Для шарнирно опертой балки при вырезах ромбовидной формы величину K_c можно вычислить по зависимости

$$K_c = G t_w / k h, \quad (12)$$

где G - модуль сдвига; t_w - толщина стенки балки; h - высота вырезов; $k = 1,93$.

Подстановка (11) и (12) в (10) позволила получить аналитическую зависимость для прогиба БРВ в виде

$$w_{\text{перф}} = w^{TT} (1 + 104\beta H A / t_w l^2), \quad (13)$$

где A - площадь поперечного сечения таврового пояса над вырезом

$$A = b_f t_f + (H/2 - t_f - \beta H/2) t_w. \quad (14)$$

Выражение (13) удобно для практических вычислений с помощью электронных таблиц Excel и может использоваться для расчета деформаций шарнирно опертых БРВ при любых видах нагрузок при относительной ширине перемычек в диапазоне $0,2 \leq \varepsilon \leq 1$ (Рисунок 8).

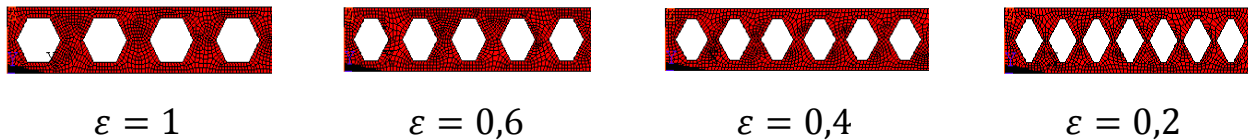
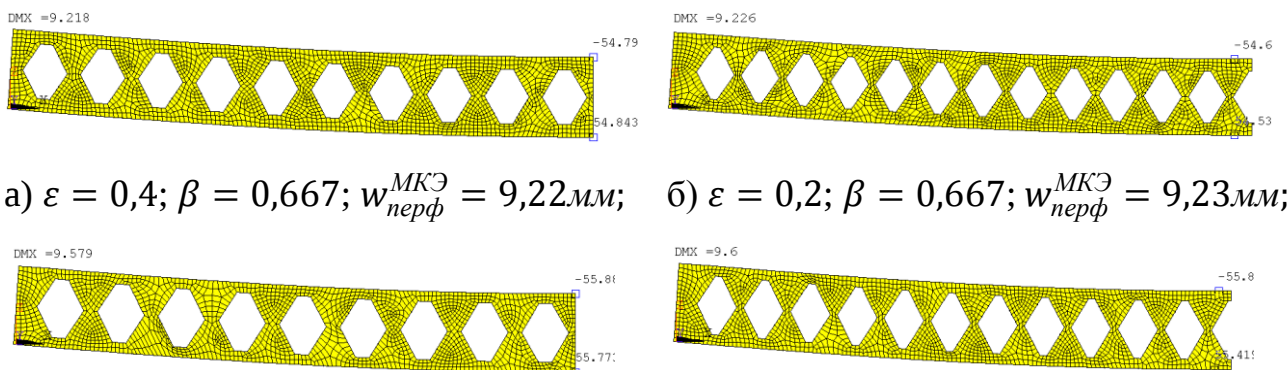


Рисунок 8 – Форма перфорации стенки при разной относительной ширине перемычек.

Результаты расчетов прогибов шарнирно опертых балок размерами 1050-75-1-17-1,52см-ε-0,667-60° под действием равномерно распределенной нагрузки $q = 10 \text{ кН/м}$ при разной относительной ширине перемычек $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,2$, представленные на рисунке 9, а и рисунке 9, б, показывают, что при постоянной высоте вырезов влияние ширины перемычек ε на величине прогиба практически не сказывается, что и отражается в зависимости (13). Связано это не только с тем, что при фиксированном угле наклона сторон ϑ площадь вырезов остается неизменной при любом параметре ε , но также и с одинаковым распределением материала балки по высоте.



$$\text{в) } \varepsilon = 0,4; \beta = 0,73; w_{\text{перф}}^{\text{МКЭ}} = 9,58\text{мм} \quad \text{г) } \varepsilon = 0,2; \beta = 0,73; w_{\text{перф}}^{\text{МКЭ}} = 9,6\text{мм}$$

Рисунок 9 – Прогибы шарнирно опертых балок с разной перфорацией, мм

Наличие ромбовидной перфорации с вырезами высотой 0,667H при угле наклона сторон $\vartheta = 60^\circ$ независимо от ширины перемычек снижает изгибную жесткость балки примерно на 20-22% по сравнению с балкой тех же размеров без вырезов. Уменьшение угла наклона сторон с $\vartheta = 60^\circ$ до $\vartheta = 45^\circ$ повышает изгибную жесткость балки всего на 2-3% в диапазоне $0,2 \leq \varepsilon \leq 0,8$, а увеличение угла с $\vartheta = 60^\circ$ до $\vartheta = 75^\circ$ примерно так же снижает жесткость балки. Объяснить это можно тем, что при той же площади вырезов в первом случае материал перераспределяется ближе к полкам, а во втором – ближе к нейтральной оси.

Увеличение относительной высоты вырезов с $\beta = 0,667$ до $\beta = 0,73$ при $\vartheta = 60^\circ$ снижает изгибную жесткость примерно на 4% (Рисунок 9, б и г).

Полученное решение (13) применимо и для других видов нагрузки. Например, для этой же балки, нагруженной сосредоточенной силой $P = ql$ посередине пролета, прогиб по МКЭ (Рисунок 10, а) составляет $w_{\text{перф}}^{\text{МКЭ}} = 15,17\text{мм}$, а вычисленный по (13) приводит к значению $w_{\text{перф}}^{\text{ТСС}} = 14,8\text{мм}$. Расхождение в величинах не превышает 2,4%. На рисунке 10, б показаны значения прогибов по МКЭ и по ТСС для балки, нагруженной двумя силами $P = ql/2$, приложенными на расстояниях $l/4$ от опор.

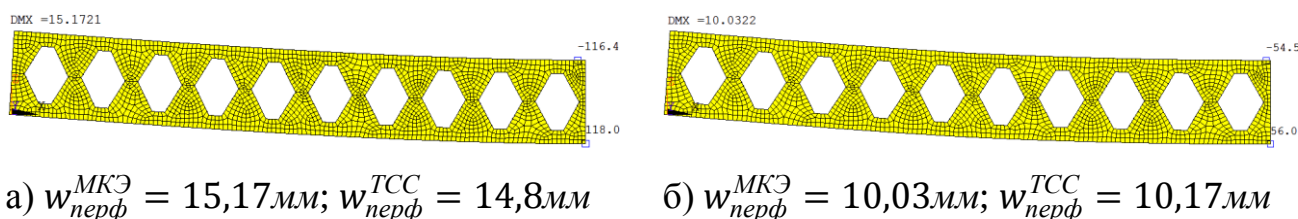


Рисунок 10 – Прогибы шарнирно опертых балок: а) при сосредоточенной силе P в центре; б) при двух сосредоточенных силах на расстоянии $l/4$ от опор; мм

Поскольку классическую перфорацию с шестиугольными вырезами правильной формы можно рассматривать как частный случай ромбовидной перфорации при $\varepsilon = 1$, то зависимость (13) распространяется и на балки с классической перфорацией, что подтверждено расчетами, приведенными в работе.

Четвертая глава посвящена исследованию местной устойчивости балок с ромбовидной перфорацией, которая чаще всего определяется устойчивостью перемычек от действия усилий сдвига T , возникающих на уровне нейтральной оси при поперечном изгибе (Рисунок 2, б). Усилие сдвига вызывает изгиб половины перемычки в плоскости стенки, при этом в горизонтальных сечениях у кромок перемычки возникают максимальные величины нормальных напряжений σ_z , которые приводят к выпучиванию перемычек.

Характерной особенностью БРВ является то, что при одинаковой высоте вырезов различия в перфорации стенки по ε почти не сказываются на ее местной устойчивости. При разных величинах ε расхождение в критических нагрузках не превышает 3% (Рисунок 11).

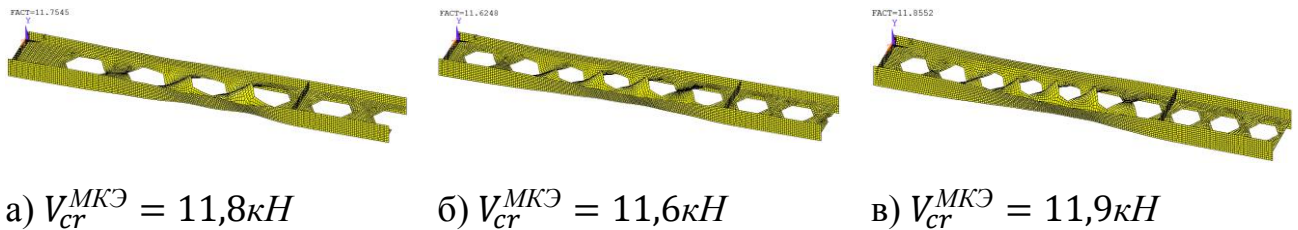


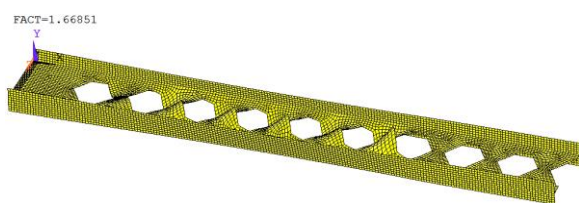
Рисунок 11 – Величина критической поперечной нагрузки $V_{cr}^{МКЭ}$ для балок с ромбовидными вырезами с разной относительной шириной перемычек: а) $\varepsilon = 1$; б) $\varepsilon = 0,6$; в) $\varepsilon = 0,4$; кН

При анализе результатов расчета МКЭ местной устойчивости перфорированных балок с ромбовидными вырезами было установлено, что, как и в балках с круглой перфорацией стенки, критическая величина поперечной силы V_{cr} балки обратно пропорциональна высоте стенки h_w , пропорциональна кубу толщины стенки t_w^3 , линейно зависит от относительной высоты вырезов β и модуля упругости E . Слабо влияет на местную устойчивость ромбовидно перфорированной балки относительная ширина перемычек ε , а также размеры полков в диапазоне практически значимых соотношений площадей полка-стенка. Эмпирическая зависимость для критического значения поперечной силы была получена в виде

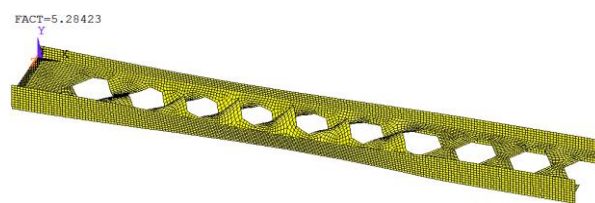
$$V_{cr}^{непф} = 3,25(1 - 0,555\beta)t_w^3 E/h_w. \quad (15)$$

Зависимость (15) применима для расчета $V_{cr}^{перф}$ двутавровых перфорированных балок с относительной высотой вырезов $0,667 \leq \beta \leq 0,75$, соотношением площадей полков и стенки $0,4 \leq A_f/A_w \leq 0,6$ и относительной шириной перемычек $0,4 \leq \varepsilon \leq 1$. Хотя зависимость (15) является приближенной, в большинстве случаев она дает приемлемые результаты вычислений $V_{cr}^{перф}$.

Сопоставление расчетов МКЭ с результатами по зависимости (15) проводилось для балок 400-28- t_w -10-0,3см- β -0,4 с разной толщиной стенки t_w и разной величиной β , нагруженных двумя силами. На рисунке 12 приведены результаты для балок с $t_w = 1$ мм и $t_w = 1,5$ мм при $\beta = 0,667$.



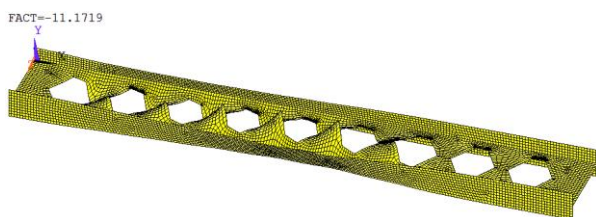
а) $V_{cr}^{МКЭ} = 1,67 \text{ кН}$



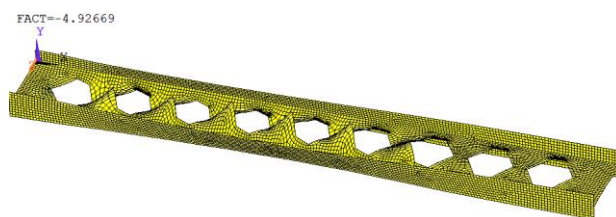
б) $V_{cr}^{МКЭ} = 5,28 \text{ кН};$

Рисунок 12 – Влияние толщины стенки на величину критической поперечной нагрузки V_{cr} (кН) при относительной высоте вырезов $\beta = 0,667$: а) $t_w = 1$ мм; б) $t_w = 1,5$ мм

Ниже на рисунке 13 приведены результаты для балок с $t_w = 2$ мм и $t_w = 1,5$ мм при относительной высоте вырезов $\beta = 0,7$.



а) $V_{cr}^{МКЭ} = 11,17 \text{ кН}$



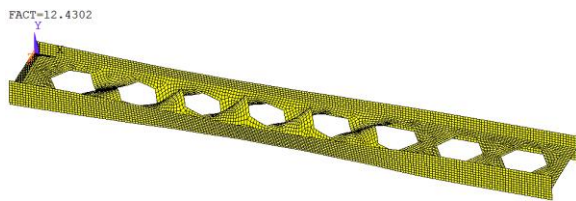
б) $V_{cr}^{МКЭ} = 4,93 \text{ кН}$

Рисунок 13 – Влияние толщины стенки на величину критической поперечной нагрузки V_{cr} (кН) при относительной высоте вырезов $\beta = 0,7$: а) $t_w = 2$ мм; б) $t_w = 1,5$ мм

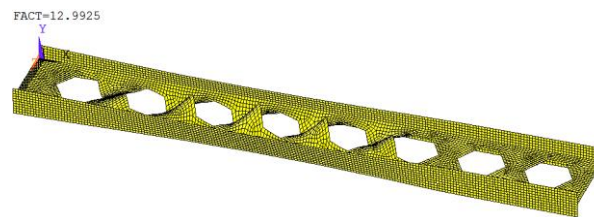
Расхождение результатов в обоих случаях не превышает 8%.

Отсутствие параметров полков в зависимости (15) указывает на то, что их роль в устойчивости перемычек невелика. Как видно из расчетов МКЭ той же балки, что приведена на рисунке 13а, для других толщин полков $t_f = 0,4$ см и $t_f = 0,5$ см

(Рисунок 14), критическая нагрузка принимает значения $V_{cr}^{МКЭ} = 12,4$ кН и $V_{cr}^{МКЭ} = 13$ кН соответственно.



а) $V_{cr}^{МКЭ} = 12,4$ кН



б) $V_{cr}^{МКЭ} = 13$ кН

Рисунок 14 – Влияние толщины полок на величину критической поперечной нагрузки V_{cr} (кН) : а) $t_f = 0,4$ см; б) $t_f = 0,5$ см

Сопоставив значения рисунка 14 с полученной по (15) величиной $V_{cr} = 12,28$ кН, можно отметить, что площадь полок влияет на величину V_{cr} , так как полки тоже воспринимают часть поперечной нагрузки, уменьшая тем самым ее величину, приходящуюся на стенку, в результате чего и происходит некоторое возрастание уровня V_{cr} . При реальном соотношении площадей полки и стенки перфорированных балок увеличение этого отношения с 0,56 до 0,71 вызывает рост V_{cr} всего на 4,8%.

Характерно, что местная потеря устойчивости обусловлена именно действием поперечной силы, а не момента, так как устойчивость теряют сразу несколько перемычек (Рисунок 14).

В этой же главе проведена экспериментальная проверка полученных зависимостей. Для оценки прогибов, напряжений и критической нагрузки была проведена серия испытаний на трех четырехметровых балках Б-0.4; Б-0.6; Б-1. Различие в моделях, имевших размеры 400-28-0,2-10-0,3см-0,667-ε-60°, состояло только в величине относительной ширины перемычек ε, равной ε=0,4; 0,6 и 1. Вид одной из моделей показан на рисунке 15. Материал двутавровых балок – сталь С-345.

Расчетная схема предусматривала нагружение двухконсольной шарнирно опертой балки двумя сосредоточенными силами V , симметрично приложенными на расстоянии 1,5м от каждой из опор, через динамометры ДР-2 с помощью талрепов (Рисунок 15). Расстояние между опорами составляло 1м. Такое

нагружение обеспечивало возможность проверки уровня напряжений при поперечном и при чистом изгибе. Размеры балки были выбраны с таким расчетом, чтобы потеря местной устойчивости происходила в упругой стадии.



Рисунок 15 – Установка для испытания на устойчивость балок с ромбовидной перфорацией

Для предотвращения потери устойчивости стенки от вертикального сжатия в районе опор и в зонах приложения сил были установлены ребра жесткости, а для исключения потери плоской формы изгиба балок к опорным стойкам, на которых помещалась балка, винтами крепились два П-образных ограничителя (Рисунок 15).

Для измерения уровня напряжений использовались тензорезисторы базой 1 мм, наклеиваемые вблизи угловых скруглений вырезов и на полках посередине пролета. Измерение прогибов, а также фиксирование процесса выпучивания перемычек при испытании на устойчивость производилось индикаторами часового типа с ценой деления 0,01мм (Рисунок 16, а).



а)



б)

Рисунок 16 – Испытание балки Б-0.4: а) схема расположения одного из индикаторов; б) общий вид потери устойчивости перемычек

По снимавшимся с помощью тензостанции ТА-12 показаниям тензорезисторов величины напряжений представлены в приводимой ниже таблице 1. В этой же таблице указаны также величины напряжений, полученных расчетом МКЭ и по зависимости (4). Как видно из таблицы 1, расхождение в величинах

напряжений МКЭ и по (4) в зоне вырезов не превышает 3,5%, а в эксперименте оно составило 7%. В последнем столбце указаны напряжения при чистом изгибе, где наблюдается хорошее соответствие в напряжениях $\sigma_{max}^{МКЭ}$ и $\sigma_{max}^{эксп}$.

Таблица 1– Напряжения (МПа) в перфорированной балке Б-0.4 при нагрузке $P = 5кН$

Метод расчета	Напряжения в полке	Номер выреза			Зона чистого изгиба
		4	5	6	
МКЭ	74,5	176	192	209	145
По (4)	-	178,4	194,8	211,1	-
Эксперимент	76	181	190	203	150

Величины критических нагрузок $V_{cr}^{эксп}$ у всех испытанных балок оказались довольно близки, как показано в таблице 2.

Таблица 2 – Критические нагрузки $V_{cr}^{эксп}$ (кН) балок с ромбовидными вырезами при потере местной устойчивости

Метод расчета	Тип балки		
	Б-0.4	Б-0.6	Б-1
МКЭ	12,1	11,9	11,6
По (15)	12,3	12,3	12,3
Эксперимент	11,8	11,2	10,9

Данные по прогибам представлены в сводной таблице 3.

Таблица 3 – Прогибы (мм) перфорированных балок с ромбовидными вырезами, нагруженных сосредоточенными силами $P = 5кН$ на консолях

Метод расчета	Тип балки		
	Б-0.4	Б-0.6	Б-1
МКЭ	4,6	4,62	4,76
По (13)	4,6	4,6	4,6
Эксперимент	4,68	4,74	4,80

В целом, результаты расчетов по зависимостям (4), (13) и (15) свидетельствуют об удовлетворительном их согласовании с данными экспериментальных исследований и расчетами МКЭ.

Наряду с испытаниями натурных конструкций были проведены испытания на устойчивость моделей из жести 300-28-0,2-10-0,3мм-0,667-ε-60° (Рисунок 17).

Испытано было две модели с $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,6$. Балки испытывались в специальном стенде, обеспечивавшем шарнирное опирание концов и нагружение сосредоточенной силой посередине пролета (Рисунок 17, а). Потеря устойчивости перемычек показана на рисунке 17, б).



а)



б)

Рисунок 17 – Испытание модели балок с ромбовидными вырезами из жести: а) нагружение сосредоточенной силой; б) потеря устойчивости перемычек.

Цель этих испытаний заключалась в том, чтобы убедиться в надежности моделирования устойчивости на маломасштабных балках из жести, сопоставив результаты полноразмерной конструкции и модели.

Результат испытания модели с $\varepsilon = 0,6$ показал, что выпучивание перемычек происходит при сосредоточенной силе $F_{cr}^{mod} = 2V_{cr}^{mod} = 228H$, а потеря местной устойчивости натурной конструкции имела место при $V_{cr}^{nam} = 11,8кН$. При полном геометрическом подобии пересчет результата модели на натуру можно произвести по соотношению

$$V_{cr}^{nam} = C_t^3 V_{cr}^{mod} / C_y, \quad (16)$$

из которого с учетом равенства констант подобия по толщине и высоте $C_t = C_y = 10$ получим $V_{cr}^{nam} = 10^2 F_{cr}^{mod} / 2 = 11,4кН$. Расхождение с экспериментом натуре составляет 3,6%.

Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. На языке ANSYS разработана программа создания расчетной модели перфорированной балки с ромбовидными вырезами в стенке.

2. Установлено, что при сосредоточенной нагрузке величины максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{max}^{экв}$ вблизи контуров вырезов распределяются пропорционально величине изгибающего момента.

3. Получена эмпирическая зависимость для оценки $\sigma_{max}^{экв}$ в балках с ромбовидными вырезами при постоянной поперечной силе и фиксированном радиусе скругления углов и разных параметрах перфорации.

4. Получены оценки величин коэффициентов концентрации напряжений по Мизесу в районе вырезов при поперечном и чистом изгибе.

5. Установлено, что при постоянной высоте вырезов изменение относительной ширины перемычек в диапазоне $0,4 \leq \varepsilon \leq 0,8$ практически не влияет ни на величину прогиба, ни на критическую нагрузку, соответствующую местной потере устойчивости от сдвига.

6. Получена аналитическая зависимость для оценки прогибов БРВ при разных параметрах перфорации на основе теории составных стержней.

7. Установлено, что в балке с ромбовидными вырезами уровень напряжений при поперечном изгибе на 10-15% ниже, чем в балке с шестиугольными вырезами правильной формы.

8. Получена эмпирическая зависимость для оценки критической нагрузки БРВ, соответствующей местной потере устойчивости стенки при сдвиге.

9. Установлено, что ромбовидная перфорация не изменяет весовые параметры балки по сравнению с классической перфорацией шестиугольными вырезами правильной формы.

10. Разработана технология получения маломасштабных моделей из жести с помощью гидроабразивной резки, позволяющая получать модели с идеально плоскими стенками, и пайки с определенным термическим режимом, используемой при соединении полок со стенкой.

11. Проведенные испытания на устойчивость натурных конструкций и маломасштабных моделей доказали высокую эффективность последних при существенном снижении стоимости.

12. Экспериментальные исследования конструкций, как и расчеты МКЭ, подтвердили приемлемость полученных в работе аналитических и эмпирических зависимостей.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследований

1. Сходимость результатов численных расчетов методом конечных элементов с экспериментальными данными подтверждает высокую эффективность компьютерного моделирования и дает возможность использования данного инструмента для широкого спектра инженерных задач, включая различные условия нагружения БРВ.

2. Перспективным направлением дальнейшего исследования является изучение балок с поясами разной площади с целью повышения местной устойчивости БРВ, со смещением по вертикали оси расположения вырезов, изучение биметаллических балок.

3. Практический интерес представляет исследование предельной нагрузки перфорированных балок, а также исследование общей устойчивости балок с ромбовидными вырезами.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях Перечня ВАК:

1. Притыкин А. И. Оценка уровня напряжений в перфорированных балках с шестиугольными скругленными вырезами при поперечном изгибе / А. И. Притыкин, **К. А. Емельянов** // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 6. – С. 9-14.

2. Притыкин А. И. Определение прогибов балок с ромбовидной перфорацией стенки / А. И. Притыкин, **К. А. Емельянов** // Вестник МГСУ. – 2018. Т.13. Вып. 7. – С. 814-823.

Публикации в других изданиях:

3. Pritykin A. Influence of transverse force and bending moment on stress concentration in perforated beam / A. Pritykin, **К. Emelianov** // Proceedings of 18th international conference «Mechanika-2013». – Lithuania, Kaunas: Technologija, 2013. – P. 199-203.
4. Притыкин А. И. Влияние параметров перфорации на концентрацию напряжений в балках с шестиугольными вырезами / А. И. Притыкин, **К. А. Емельянов** // Материалы международной НПК «Наука и техника: отклики сегодня». – Киев, 2013. – С.12-16.
5. Pritykin A. To structural norms for castellated beams deflections /A. Pritykin, **К. Emelianov** // Proceedings of 19th international conference «Mechanika-2014». – Lithuania, Kaunas: Technologija, 2014. – P. 207-212.
6. Притыкин А. И. О нормировании прогибов перфорированных балок с шестиугольными вырезами /А. И. Притыкин, **К. А. Емельянов** // Известия КГТУ. – 2015. – №36. – С. 164-174.
7. **Емельянов К. А.** Закономерности распределения касательных напряжений в перемычках перфорированных балок-стенок / **К. А. Емельянов**, А. И. Притыкин // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т.4. № 1. – С. 61-69.
8. Pritykin A. I. Local stability of castellated beams with diamond-shape openings: FEM calculation and experiment /A. I. Pritykin, **К. А. Emelianov** // Materials Science Forum «Materials and Technologies in construction and agriculture». – 2018. – Vol. 931. – P. 113-118. – Режим доступа: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.113>
9. **Емельянов К. А.** Эмпирическая оценка местной устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами. / **К. А. Емельянов**, А. И. Притыкин, А. С. Лаврова // Материалы VI Международного Балтийского морского форума. IV Международная научная конференция «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве». – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2018. – Т. VI. – С. 114-121.

10. **Емельянов К. А.** Конечно-элементный анализ напряженного состояния и устойчивости балок с ромбовидной перфорацией / **К. А. Емельянов, А. И. Притыкин** // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т.4. № 3. – С. 81-88.

11. Притыкин А. И. Конструктивные формы и расчет перфорированных балок с шестиугольными вырезами / А. И. Притыкин, **К. А. Емельянов**, А. В. Мисник // Научная конференция «Современные строительные материалы и технологии». – Калининград: Изд-во БФУ, 2019. – С. 90-104.

12. **Емельянов К. А.** Технология изготовления моделей балок с облегченной стенкой / К. А. Емельянов, А. И. Притыкин // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. ст. – Самара, 2019. – С. 117-126.

13. Притыкин А. И. Влияние ширины перемычек на местную устойчивость перфорированных балок с ромбовидными вырезами / А. И. Притыкин, **К. А. Емельянов** // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. ст. – Самара, 2019. – С. 126-133.

Объект интеллектуальной собственности

14. Притыкин А. И. Программа ИВ-НЕХ создания расчетной модели двутавровой балки с шестиугольными вырезами. / А. И. Притыкин, **К. А. Емельянов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614239 от 21.04.14г.