

На правах рукописи

Полтораднев Алексей Сергеевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ
СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ БАЛОК**

05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ) на кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» (СКЗиС).

Научный руководитель: Действительный член РААСН,
доктор технических наук, профессор
Ольков Яков Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Туснин Александр Романович
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
строительный университет»,
заведующий кафедрой «Металлические
конструкции»

доктор технических наук, профессор
Фридкин Владимир Мордухович
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ)),
профессор кафедры «Мосты»

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский
институт строительных конструкций имени В.А.
Кучеренко – филиал ОАО «НИЦ «Строительство»
(ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко)

Защита диссертации состоится « 16 » января 2013 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.05 на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ)).

Автореферат разослан « » декабря 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

М.В. Шавыкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Одним из путей снижения материоемкости строительных конструкций является оптимальное распределение материала по площадям поперечных сечений в соответствии с напряженно-деформированным состоянием элементов. Этому направлению отвечает применение тонколистовой стали для балок двутаврового сечения. Балки с гибкой, либо гофрированной стенкой по весу более экономичны, чем обычные сварные двутавры, в среднем на 15-25%.

Как правило, размеры элементов таких балок (шаг ребер, сечение стенки, амплитуда гофров) назначаются постоянными на протяжении всего пролета. Это обуславливает равные значения несущей способности на сдвиг во всех сечениях балки. В результате на менее напряженных участках прочность стали используется не полностью. В связи с этим актуальной задачей повышения эффективности использования тонкостенных балок является оптимизация известных конструктивных решений с учетом характера распределения внутренних усилий от нагрузки.

Цель исследования – развитие конструктивных решений тонкостенных балок с целью приближения несущей способности на сдвиг поперечных сечений к эпюре внутренних усилий.

Задачи исследования:

- сформулировать и решить задачу параметрической оптимизации балок с гибкой и поперечно-гофрированной стенкой;
- разработать методику и эффективный алгоритм параметрической оптимизации тонкостенных балок;
- с помощью методов структурной оптимизации провести поиск новых конструктивных решений тонкостенных двутавровых балок, направленный на снижение расхода материала с учетом действительного распределения внутренних усилий;
- исследовать эффективность работы тонкостенных балок с гофрированной на опорах стенкой;
- изучить НДС предложенных конструктивных решений, выявить отличия от известных тонкостенных балок;
- дать развитие методики расчета тонкостенных балок с учетом предлагаемых особенностей конструктивных решений.

Научная новизна диссертации:

1. На основе принципов развития технических систем получено новое конструктивное решение тонкостенных балок, объединяющее гофрированные элементы на опорах и плоские – в середине пролета. Новизна решения защищена патентом РФ №107219.

2. Выявлена зависимость длины отсека необходимой несущей способности от удаленности отсека от опоры, относительной высоты балки, гибкости стенки, величины равномерно-распределенной нагрузки.

3. Определены граничные размеры гофров (длина и высота волны), при которых обеспечивается несущая способность гофрированной стенки в зависимости от толщины стенки и предела прочности стали на сдвиг.

4. Введено понятие интенсивности гофрирования, позволяющее учесть степень износа листогибочного оборудования при вычислении целевой функции параметрической оптимизации балок с гофрированной стенкой.

Достоверность результатов обусловлена использованием общепринятых мето-

дов расчета стальных тонкостенных балок, апробированного программного комплекса с применением метода конечных элементов и их сходимостью с экспериментальными данными.

Практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

- разработаны конструктивные решения тонкостенных балок с переменным шагом поперечных ребер жесткости и с гофрированной на опорах стенкой, позволяющие сократить массу балки до 20%;
- предложена методика параметрической оптимизации двутавровых балок с гибкой стенкой и с поперечно-гофрированной стенкой;
- получены инженерные формулы для рационального проектирования предложенных конструктивных решений – назначения переменных параметров стенки, при которых соблюдаются условия необходимой несущей способности каждого отсека с полным использованием прочности стали на сдвиг;
- построены графики, позволяющие назначить оптимальные размеры гофров (длину и высоту волны), при которых обеспечивается достаточная несущая способность гофрированной стенки в зависимости от толщины стенки и предела прочности стали на сдвиг;
- даны практические рекомендации по оптимальному проектированию и расчету тонкостенных балок с варьируемой сдвиговой прочностью стенки.

Внедрение результатов. Результаты проведенных исследований используются ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – филиал ОАО «НИЦ «Строительство» при разработке технических условий, стандартов организаций и прочих нормативных документов, ЗАО «ЭРКОН» для технико-экономического обоснования применения балок с гофрированной стенкой в качестве стропильных конструкций. ООО «Проф Эксперт» применена балка с гофрированной на опорных участках стенкой для покрытия одноэтажного производственного цеха пролетом 24 метра в Московской области.

Разработано методическое пособие «Проектирование стальных тонкостенных балок с варьируемой сдвиговой прочностью стенки» для студентов по направлению подготовки 270800 «Строительство» и специальности 271101 «Строительство уникальных зданий и сооружений» для использования в учебном процессе МИИТа.

На защиту выносятся:

- конструктивные решения, направленные на повышение рациональности использования материала: балки с гибкой стенкой с переменным шагом поперечных ребер жесткости; комбинированные балки с гофрированной на опорах и гладкой в пролете стенкой;
- инженерные формулы для проектирования предложенных видов тонкостенных балок с варьируемыми параметрами;
- особенности НДС балок с варьируемой длиной отсеков, с гофрированной стенкой в опорных отсеках;
- методика и алгоритм параметрической оптимизации балок с гибкой стенкой, балок с гофрированной стенкой с волнистыми и треугольными гофрами;
- область оптимальных размеров волнистых и треугольных гофров;

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены на международных академических чтениях РААСН «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (Курск, 2011 г.), Международном конгрессе «Наука и инновации в современном строительстве – 2012», посвященном 180-летию

СПбГАСУ (С.-Петербург, 2012г.), международной конференции «Биосферно-совместимые технологии в развитии регионов» (Курск, 2011 г.), XV Международной межвузовской научно-практической конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2012 г.), научно-практических конференциях «Наука МИИТ – транспорту» (Москва, 2009-2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе три статьи в научных журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендаемых ВАК и описание патента РФ.

Состав и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Основной текст изложен на 183 страницах и содержит 70 рисунков, 33 таблицы, список литературы из 124 наименований, объем 5 приложений составляет 33 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса, изложению задач исследования. Представлен исторический очерк исследований балок с гибкой стенкой и балок с гофрированной стенкой, сравнительный анализ требований к их расчету в российских и зарубежных нормах проектирования, описан мировой опыт применения тонкостенных двутавров.

Двутавровый стержень считается тонкостенным, когда высота стенки более чем в 200 раз превышает свою толщину. В зависимости от очертания поверхности стенки различают: балки с гибкой (плоской, гладкой) стенкой и балки с гофрированной стенкой (пространственная форма стенки). Последние могут иметь разную форму гофров: волнистые (синусоидальный профиль); треугольные гофры; трапециевидный профиль.

Исследованию балок с гибкой стенкой посвящены работы отечественных ученых И.И. Ааре, С.И. Иднурма, Б.М. Броуде, А.А. Евстратова, М.Д. Корчака, Н.П. Мельникова, И.В. Левитанского, В.В. Каленова, М.В. Предтеченского, И.К. Погадаева, Е. Ендрики, Н.А. Журавлева, Ю.Н. Симакова, Ю.В. Сухарева и др., а также зарубежных исследователей С. Бергмана, Й. Дьюбека, К. Баслера и Б. Тюрлимана, З. Садовского, И. Фуджии, С. Черна и А. Остапенко, К. Роки и М. Шкалоуда, Х. Херцога, Т. Хеглунда и др.

Очень тонкая стенка выпучивается уже на первых ступенях нагружения. Образованная наклонная складка по аналогии с фермой играет роль растянутого раскоса, ребра жесткости – сжатых стоек. При этом надежность конструкции не утрачивается, реализуется закритический резерв несущей способности (рис. 1). Предельная нагрузка на балку определяется несущей способностью отсеков, которые находятся в разных условиях работы: чистый сдвиг на опорах, чистый изгиб в середине пролета, а совместному действию изгиба со сдвигом подвержены промежуточные отсеки.

Наиболее удобной для практических расчетов оказалась методика Рокки-Шкалоуда, согласно которой несущая способность отсека определяется по расчетной схеме, учитывающей перераспределение напряжений после выпучивания стенки. Точность методики подтверждена работами И.В. Левитанского, В.В. Каленова, что способствовало появлению в 1977г. первых в СССР нормативных требований к расчету таких балок. Инженерные формулы для расчета предельной поперечной силы Q_u , изгибающего момента M_u включены в СП 16.13330:



Рис. 1. Закритический резерв несущей способности балки с гибкой стенкой.

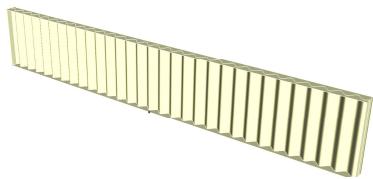


Рис. 2. Балка с вертикально гофрированной стенкой.

$$Q_u = R_s t_w h_w \left[\frac{\tau_{cr}}{R_s} + 3,3 \left(1 - \frac{\tau_{cr}}{R_s} \right) \frac{\beta \mu}{1 + \mu^2} \right]; \quad M_u = R_y t_w h_w^2 \left[\frac{A_f}{t_w h_w} + \frac{0,85}{\lambda_w} \left(1 - \frac{1}{\lambda_w} \right) \right] \quad (1)$$

В европейских нормах Eurocode EN 1993-1-5 не упоминается термин «балка с гибкой стенкой» (англ. – slender plate girder), но в целом требования этого документа позволяют проектировать такие конструкции.

Вопросы оптимизации балок с гибкой стенкой затрагиваются в докторской диссертации И.К. Погадаева. Автором предложены формулы для определения оптимальной гибкости стенки и высоты балки, даны рекомендации по назначению постоянного шага поперечных ребер жесткости.

В 1936г. В.Н. Горновым на техническом совете ЦНИИПС (ЦНИИСК им. Кучеренко) впервые предложено применять для стенок высоких балок волнистое железо или вотерены (рис. 2). Эта работа положила начало подробному изучению балок с гофрированной стенкой учеными М.К. Глозманом и Ш.З. Локшиным, А.Г. Ажермачевым, Е.М. Концевым, П.А. Дмитриевым и Ю.К. Осиповым, В.Ф. Кириленко и Г.А. Окрайнец, В.А. Труль, О.П. Стариковым, С.Б. Бономанко, П.И. Семеновым, В.В. Бирюлевым, К.К. Неждановым, В.Г. Аржаковым, В.Г. Огневым, А.Н. Кретининым, П.И. Егоровым, С.В. Кудрявцевым и др.

Волнистая стенка не воспринимает напряжений в продольном направлении, а работает только на сдвиг. Изгибающий момент воспринимается только поясами. В работах А.Н. Степаненко, П.И. Егорова уточняется напряженное состояние поясов путем учета изгибо-крутящих напряжений в их плоскости, передаваемых от стенки при восприятии ею сдвига.

Я.И. Ольковым и А.Н. Степаненко в 1968-1972 гг. проведены экспериментальные исследования балок с гофрированной стенкой. Установлено, что предельное состояние характеризуется общей потерей устойчивости стенки (в пределах нескольких гофров), либо – местной (в пределах одного гофра). Критические напряжения для волнистых стенок предложено определять по формулам:

$$\tau_{cr,loc} = 12,9(h_w/(k a))R_s / \bar{\lambda}_w^2; \quad \tau_{cr} = k_\tau \cdot R_s / \bar{\lambda}_w^2. \quad (2)$$

Балки с треугольно-гофрированной стенкой активно исследуются в Казахском отделении ЦНИИПСК Г.М. Остриковым, Ю.С. Максимовым, В.В. Долинским, Т.В. Михайловой, С.Г. Барановской. Авторами получены формулы для критических напряжений для треугольных стенок:

$$\tau_{p,cr} = 1,12 C_{p,cr} R_s / \bar{\lambda}_c^2, \quad \tau_{o,cr} = 1,12 \cdot C_{o,cr} \cdot R_s / \bar{\lambda}_w^2. \quad (3)$$

СНиП Республики Казахстан содержит требования к расчету балок с треугольно-гофрированными стенками, разработан ряд типовых серий, балки широко внедряются на территории республики.

Не смотря на то, что в российских нормах проектирования отсутствуют требо-

вания к расчету балок с гофрированными стенками, за последние пять лет на территории России и Украины растут объемы их внедрения. Балки с волнистой стенкой изготавливаются на технологических линиях австрийской компании «Zeman», размеры гофров ограничены фирменным сортаментом и определены с учетом требований Еврокода EN 1993-1-5. Такие балки уже давно применяются на территории Австрии, Германии, Франции и других европейских стран.

Балки с трапециевидной формой гофров используются в основном в скандинавских странах (Швеция, Нидерланды, Финляндия и др.), а также в Японии, США и Южной Корее при строительстве автодорожных мостов.

Анализ реферируемых работ позволил установить, что увеличение гибкости стенки двутаврового сечения позволяет сконцентрировать материал в поясах и добиться до 30% экономии стали. Исключение значительного количества поперечных ребер жесткости обеспечивает снижение трудозатрат на изготовление балок с гофрированной стенкой до 25%.

Эффективность тонкостенных двутавров увеличится, если исключить перерасход материала на менее напряженных участках, где прочность стали используется не полностью. В свете этой проблемы особый интерес представляют работы, в которых подчеркивается актуальность исследований, направленных на развитие существующих конструктивных решений тонкостенных балок.

В работе А.Н. Кретинина доказывается возможность применения оцинкованного профнастила в качестве гофрированной стенки, при этом пояса изготавливаются из холодногнутых профилей. Исследование С.В. Кудрявцева направлено на уточнение НДС и разработку методики проектирования балок с гофрированной стенкой, ослабленной круговыми отверстиями.

Еще в 1981 г. в Казахском отделении ЦНИИПСК предлагалось сократить длину заготовки для треугольно-гофрированной стенки в соответствии со снижением интенсивности сдвигающих усилий в середине пролета (авторское свидетельство №857389 СССР на строительную балку с треугольными гофрами переменной высоты). В МГСУ в работе И.С. Рыбкина 2008 г. предложено в балках с волнистыми стенками устраивать более жесткие гофры на опорах и постепенно снижать интенсивность гофрирования к середине пролета вплоть до гладкой плоскости.

Однако на практике переменное гофрирование не применяется из-за отсутствия соответствующего оборудования и методики проектирования. Оптимальному проектированию тонкостенных двутавров также препятствует недостаточная изученность влияния проектных параметров на несущую способность: относительной высоты балок, формы и размеров гофров, шага ребер жесткости, класса стали и гибкости стенки.

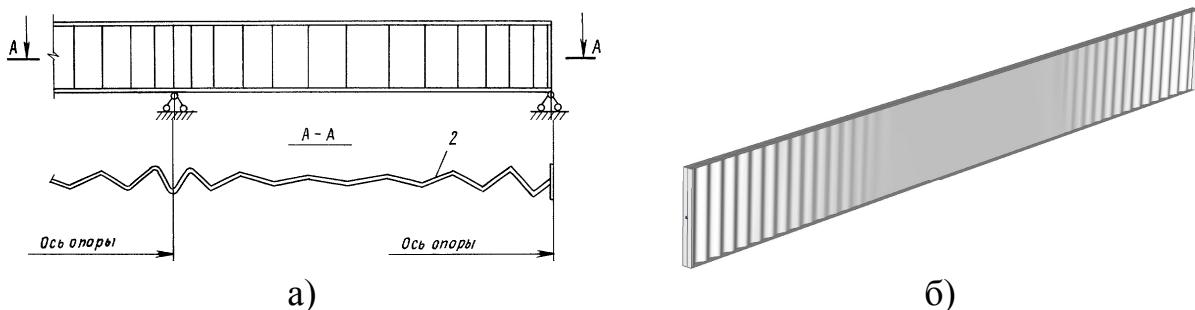


Рис. 3. Балка с переменно-гофрированной стенкой, предложенная:
а) в 1981 г. КО ЦНИИПСК; б) в 2008 г. И.С. Рыбкиным.

В последующих главах решается задача оптимизации тонкостенных балок, устанавливается взаимное влияние проектных параметров на несущую способность и технико-экономические показатели балок, проводится поиск новых более эффективных конструктивных решений, дается развитие методов проектирования с учетом особенностей предложенных решений, исследуется НДС новых видов балок.

Во второй главе разработана методика параметрической оптимизации балок с гибкой стенкой и балок с гофрированной стенкой, определены пределы варьирования параметров проектирования, предложен алгоритм оптимизации, получены оптимальные параметры тонкостенных балок, при которых обеспечивается требуемая несущая способность при наименьших затратах для большого количества проектных ситуаций.

В работе за критерий оптимизации принята заводская себестоимость. Предпочтение отдано именно заводской себестоимости, поскольку для определения более емкого показателя, – себестоимости «в деле», необходимо рассчитывать затраты на транспортировку, монтаж конструкции и эксплуатацию, что требует увеличения количества возможных проектных ситуаций, рассматриваемых в диссертации.

Цель оптимизации – минимум заводской себестоимости. Для записи целевой функции использована формула аналитического метода расчета заводской себестоимости Я.М. Лихтарникова:

$$C_u = [G_k \cdot C_{om} + T \cdot a \cdot (1 + K_{hp}) + G_k \cdot H] K_u \cdot K_p, \quad (4)$$

где G_k – масса конструкции, т;

C_{om} – стоимость материалов, руб./т;

$a \cdot (1 + K_{hp})$ – сумма затрат на изготовление конструкции, руб./чел.час;

$H = H_{\text{эксп}} + H_{\text{цех}} + H_{\text{заб}}$ – общезаводские расходы, состоящие из расходов на содержание и эксплуатацию оборудования $H_{\text{эксп}} = 0,5 \cdot H$; цеховых расходов $H_{\text{цех}} = 0,2 \cdot H$; общехозяйственных, непроизводственных расходов $H_{\text{заб}} = 0,3 \cdot H$. Для двутавровых балок: $H_{БГС} = 138,31$ руб./т;

$T = T_B + T_O$ – общая трудоемкость конструкции, складывающаяся из трудоемкости основных и вспомогательных деталей, чел./ч. Трудоемкость основных деталей: $T_O = k_T \cdot c \cdot \sqrt{G_o \cdot n_o}$, где коэффициент c для двутавровых балок: $c_{БГС} = 4$.

Недостатком этого метода является отсутствие коэффициентов для анализа стоимости конструкций с применением гофрированных элементов. В развитие метода предложено учитывать гофрирование стенки как дополнительную технологическую операцию, увеличивающую время обработки детали в среднем на 0,02 чел./ч. на 1 м длины пролета. Соответственно растет трудоемкость основных деталей, что с допустимой погрешностью учитывается увеличением коэффициента: $c_{гофр} = 4,25$.

Для изготовления и сварки гофрированных элементов требуется содержать дополнительное оборудование, стоимость которого примерно в 10 раз выше традиционного оборудования. Из этого следует пропорциональное увеличение соответствующих расходов $H_{\text{эксп}}$. Для учета износа оборудования предложено учитывать интенсивность гофрировки коэффициентом, равным произведению относительных размеров гоффа:

$$\xi = (f/a) \cdot (f/t_w) = f^2 / a \cdot t_w,$$

где f – высота волны гоффа; a – длина волны гоффа; t_w – толщина стенки.

Учитывая долевой вес эксплуатационных расходов $H_{\text{эксп}} = 0,5 \cdot H$, а также, что: $H_{БГС} = 138,31$ руб./т, получим, что для балок с гофрированной стенкой общезаводские расходы равны:

$$H_{eodpp} = 69,16 \cdot (11 + \xi \cdot [l]) \text{ руб/т.} \quad (5)$$

Проектная ситуация характеризуется неизменяемыми параметрами: длиной пролета l и величиной нагрузки q . Длина пролета принимает значения: $6 \leq l \leq 30$ м, т.к. для покрытия большепролетных зданий $l > 36$ м применение сплошностенчатых конструкций нерационально (по сравнению со сквозными конструкциями).

Границы возможных нагрузок $12 \leq q \leq 54$ кН/м определены для разных технологических процессов (отапливаемые и холодные цеха), климатических районов (от II до VI сугревового района) и шагов поперечных рам каркаса (6 и 12 м).

Варьируемые параметры оптимизации – это параметры, определяющие качество объекта. Высота стенки h_w принимает сортаментные значения, соответствующие ширине проката по ГОСТ 19903-74*. Гибкость стенки варьируется в пределах: $250 \leq \lambda_w \leq 500$. Расчетное сопротивление стали ограничено значениями: $230 \leq R_y \leq 340$ МПа, т.к. малая пластичность сталей высокой прочности ($R_y > 340$ МПа) ограничивает реализацию закритического резерва несущей способности гибкой стенки.

Для определения границ варьирования относительной длины отсеков $\mu = a/h_w$ (где a – длина отсека), сопоставлены критические касательные напряжения, при которых гибкая стенка выпучивается: $\tau_{cr} = 10,3 \cdot (1 + 0,76/\mu^2) \cdot R_s / \bar{\lambda}_{ef}^2$; с напряжениями, соответствующими исчерпанию несущей способности отсека: $\tau_{max} = Q_u / A_w$, где Q_u определяется по (1). Так получено, что если длина отсека меньше половины высоты стенки, то разрушение отсека произойдет без выпучивания стенки, то есть критический резерв несущей способности не реализуется. Из этого следует, что $\mu = 0,5$ – это минимальная относительная длина отсека с гибкой стенкой.

Усложнение трудоемкости гофрированием стенки должно быть оправдано: размеры гофров должны обеспечить увеличение несущей способности по сравнению с плоской стенкой того же сечения. На рис. 6 сплошными линиями показаны каса-

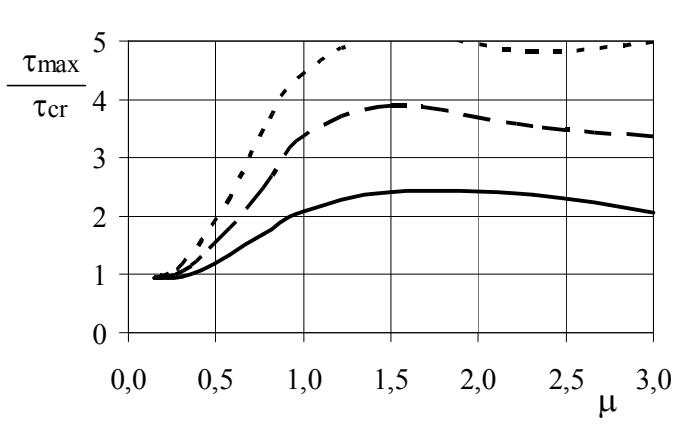


Рис. 4. Зависимость закритического резерва несущей способности стенки от относительной длины отсека.

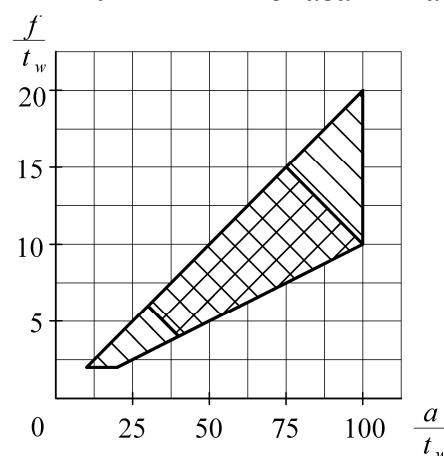
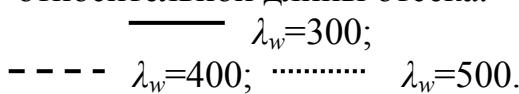


Рис. 5. Оптимальные размеры гофров:

-  для стенок с треугольными гофрами
-  для стенок с волнистыми гофрами

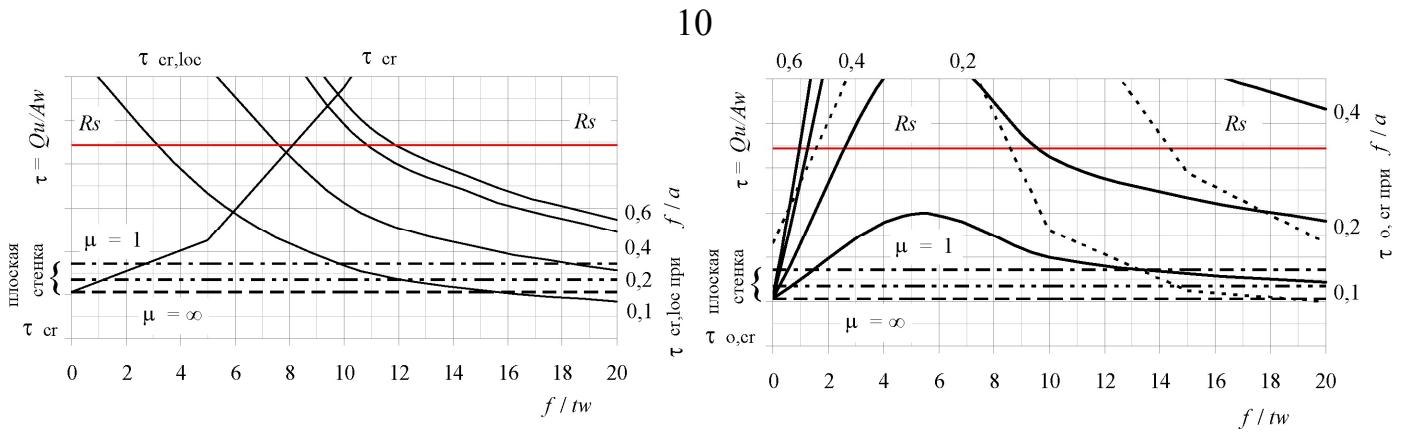


Рис. 6. Предельные касательные напряжения для балок с волнистыми (слева) и треугольными (справа) стенками.

тельные напряжения, соответствующие разрушению гофрированных стенок (местная потеря устойчивости $\tau_{cr,loc}$, либо – общая τ_{cr}); пунктирными линиями – для плоских стенок аналогичного сечения τ_{max} .

На основании графиков на рис. 6 построена область оптимальных размеров гофров в зависимости от толщины стенки, при которых обеспечивается преимущество гофрированной стенки над плоской стенкой того же сечения (рис. 5).

Результат оптимизации должен удовлетворять требованиям прочности и жесткости. Для этого необходимо сформулировать ограничения целевой функции, обращаясь к формулам для расчета несущей способности и предельного прогиба (1-3). Для удобства автоматизации расчетов данные формулы следует выражать через параметры оптимизации. Для балок с гибкой стенкой:

$$1,05 \leq \frac{Q_u}{Q} = \frac{2R_s \cdot l}{q\lambda_w(l/h_w)^2} \left[\frac{1,72 \cdot \tau_{cr}}{R_y} + 3,3 \left(1 - \frac{1,72 \cdot \tau_{cr}}{R_y} \right) \frac{\beta \cdot \mu}{1 + \mu^2} \right] \leq 1,15;$$

$$\frac{f_{max}}{f_u} = 3,26 \frac{q \cdot l^3}{EI \cdot (1,2 - 0,33\lambda_w)} \leq 0,95;$$

для балок с гофрированной стенкой:

$$1,05 \leq \frac{Q_u}{Q} = \left[\min \{ \tau_{cr,loc}; \tau_{cr}; R_s \} \right] \frac{2 \cdot l}{q\lambda_w(l/h_w)^2} \leq 1,15;$$

$$\frac{f_{max}}{f_u} = 31,25 q \left(\frac{5}{48} \frac{l^3}{EI} + \frac{\lambda_w(l/h_w)^2}{G \cdot l^5} \right) \leq 0,95.$$

Целевая функция (с учетом ограничений) задана в неявном виде и практически не дифференцируема ввиду своей сложности. Это запрещает применять методы оптимизации первого и второго порядка. Выяснить траекторию такой функции можно только с помощью значений функции в последовательном ряде точек.

При этом метод полного перебора неэффективен по причине малого быстродействия при большом количестве возможных вариантов, что делает невозможным многоокритериальную оценку. В работе предложен алгоритм направленного сокращения всех возможных альтернатив путем поэтапного отсеивания недопустимых и неоптимальных вариантов, который позволяет накапливать множество субоптимальных альтернатив с использованием языка программирования Visual Basic и выбирать оптимальный вариант по нескольким критериям (рис. 7).

На первом этапе формируются А-массивы (англ. All alternatives – все альтернативы) со всеми возможными сочетаниями параметров $\{a_i; b_i; \dots; s_i\}$, характеризующих качество объекта q_j для каждой проектной ситуации p_j . Элементы каждого массива отличаются одной переменной s_i , и только один элемент массива обеспечивает минимум стоимости, удовлетворяя при этом ограничениям целевой функции.

Из таких элементов складывается F-массив допустимых решений (англ. Feasible – допустимый), как показано на рис. 8. Далее из каждого F-массива выделяется по одной альтернативе, максимально удовлетворяющей критерию оптимальности. Так формируется новый SO-массив (англ. Suboptimal – условно оптимальный), который содержит локально оптимальные решения первого порядка. Далее, в зависимости от количества параметров оптимизации, аналогично формируются массивы субоптимальных решений второго и последующих порядков.

На последнем этапе рассматриваются альтернативы, входящие в оставшийся субоптимальный массив и из них выбирается оптимальный вариант, наиболее удовлетворяющий критериям оптимизации.

В результате параметрической оптимизации получено множество оптимальных балок для разных проектных ситуаций, несущая способность которых обеспечена с минимальными затратами. Установлено влияние каждого параметра на массу, трудоемкость и стоимость тонкостенных балок:

- применение стали повышенной прочности приводит к облегчению

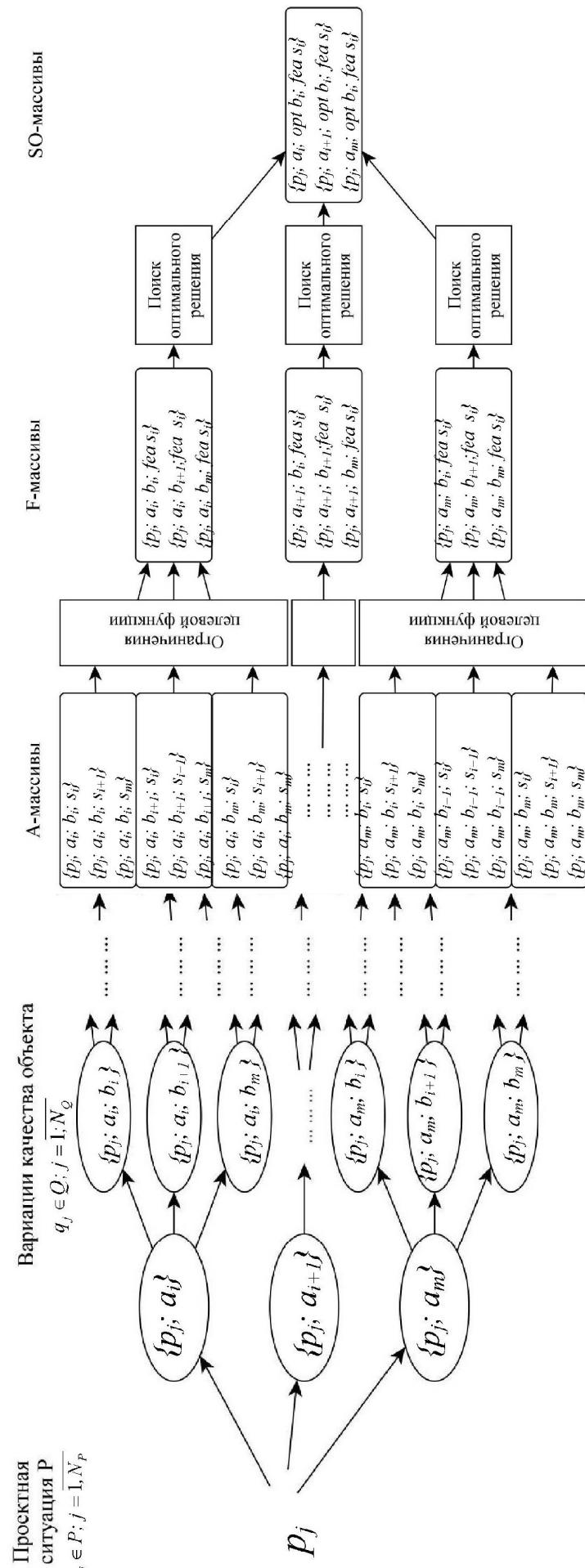


Рис. 7. Алгоритм формирования массивов субоптимальных решений.

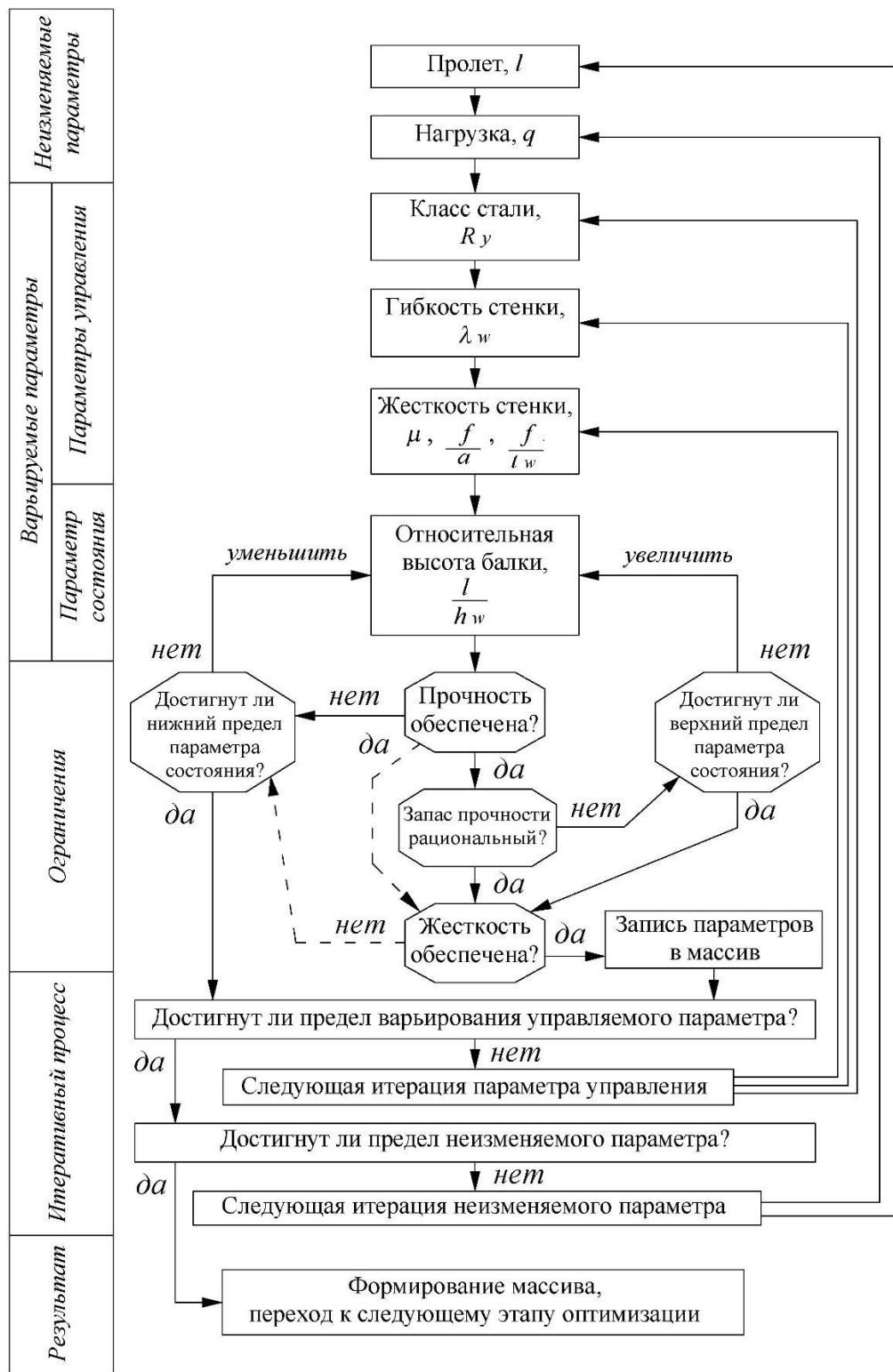


Рис. 8. Алгоритм формирования F-массива допустимых решений оптимизации тонкостенной балки.

балки на 30-60%, однако стоимость возрастает на 18-30%;

- сокращение высоты стенки требует более мощных поясов, что приводит к росту массы балки;

- увеличение гибкости стенки λ_w способствует облегчению балки;
- по мере сокращения количества отсеков (увеличения их длины), балка облегчается и становится менее трудоемкой в изготовлении;
- чрезмерно жесткие гофры ($f/t_w > 20$; $a/t_w < 25$) требуют больше заготовки, а

предельная сдвиговая несущая способность таких стенок превышает расчетное сопротивление стали на сдвиг, то есть запроектированная предельная нагрузка не будет достигнута;

- устройство очень пологих гофров ($f/t_w < 4$; $a/t_w > 100$) не имеет смысла, поскольку несущая способность такой стенки будет близка к плоской стенке.

Полученные данные использованы для изучения особенностей НДС, поиска и анализа эффективности новых конструктивных решений в следующих главах диссертации.

В третьей главе раскрывается понятие структурного синтеза тонкостенных балок, описывается методика разработки новых конструктивных решений, направленных на повышение эффективности использования материала, разрабатываются инженерные формулы, позволяющие проектировать предложенные изобретения.

В технике синтезом принято называть проектную процедуру, в результате которой происходит соединение различных элементов в единое целое. При проектировании конструкций к синтезу обращаются в тех случаях, когда типовые конструктивные решения не позволяют достичь оптимального результата.

В настоящей работе для методологического описания процедуры изобретательства используется теория решения изобретательских задач Г.С. Альтшуллера (ТРИЗ), построенная на статистическом анализе патентного фонда. Из основ ТРИЗ следует, что повышение идеальности технических систем осуществляется путем развертывания – увеличения качества полезных функций за счет усложнения системы, и свертывания – упрощения системы при сохранении или увеличении качества. Упрощению системы соответствует сокращение количества элементов, усложнение системы

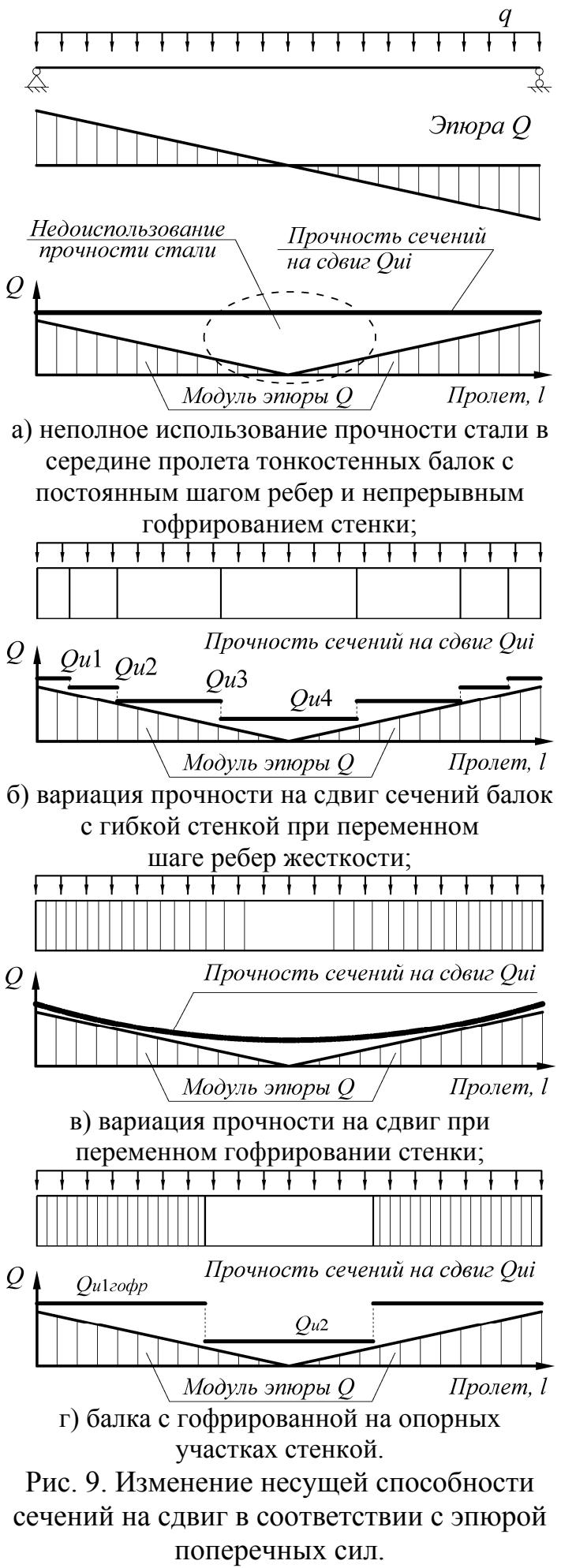


Рис. 9. Изменение несущей способности сечений на сдвиг в соответствии с эпюрай поперечных сил.

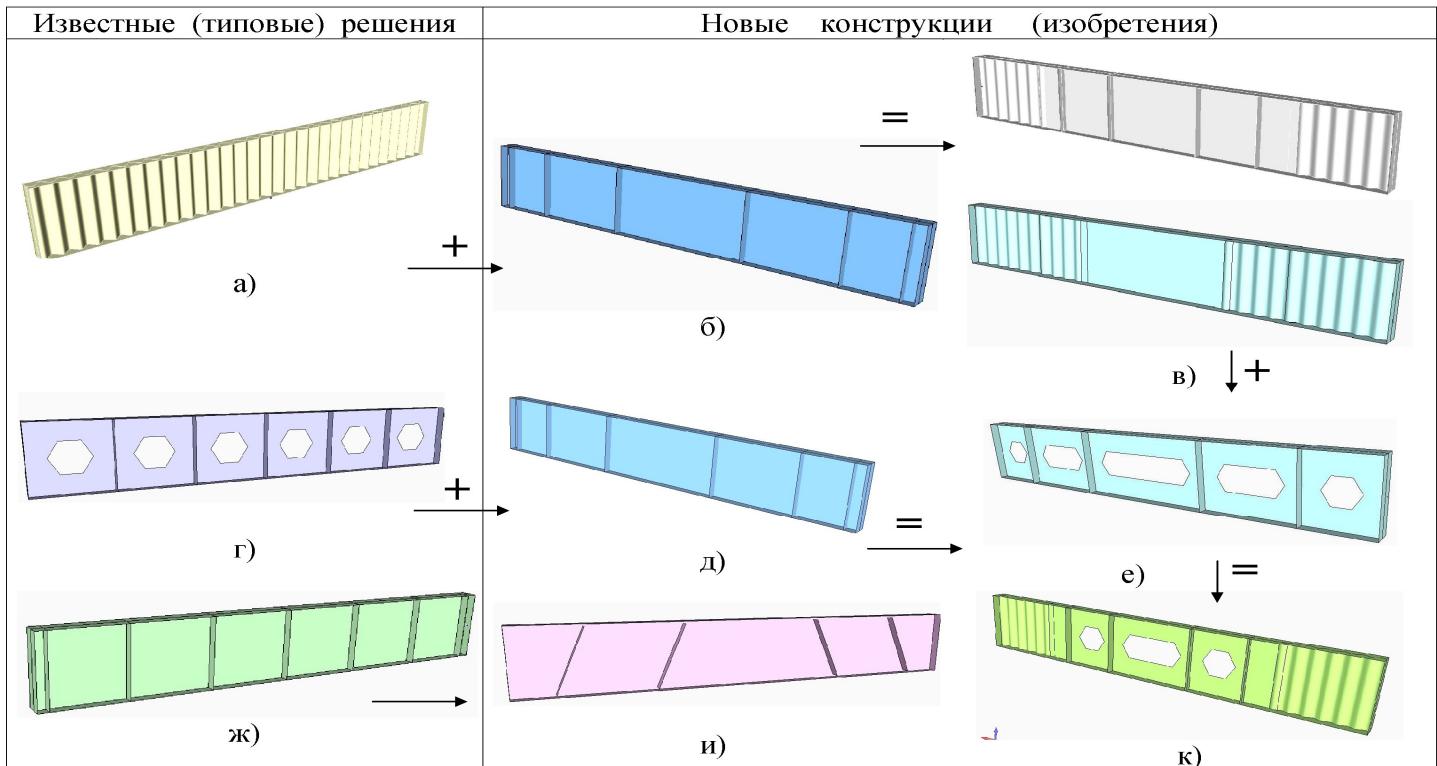


Рис. 10. Структурный синтез тонкостенных балок по принципу развертывания (усложнения) технических систем.

может осуществляться путем объединения ранее самостоятельных систем.

Поскольку сдвигающие усилия максимальны на опорных частях балки, а в середине пролета – стремятся к нулю, в балках с регулярными параметрами не полностью используется прочность материала (рис. 9а). Из формулы (1) видно, что сдвиговую прочность отсека можно снизить увеличением длины отсека, при этом сокращается количество ребер, система упрощается. Чтобы добиться полного использования прочности стали, необходимо длину отсека увеличивать постепенно в соответствии с эпюрой поперечных сил. Так, используя принцип свертывания системы, получается балка с гибкой стенкой с переменным шагом ребер (рис. 9 б, 10 б, д).

Для улучшения качества балки с гибкой стенкой путем усложнения, привлекается самостоятельная система – балка с гофрированной стенкой, достоинство которой заключается в повышенной жесткости стенки. Объединение повысит качество исходной системы, если гофрированную стенку разместить на опорных участках (рис. 9 в). При отсутствии оборудования для переменного гофрирования предлагается стыковать гофрированную стенку с плоской с нахлестом в один гофр (рис. 9 г, 10 в). При этом место сопряжения можно укрепить односторонним ребром. Гофрированная стенка может быть получена путем штамповки, прокатки; не исключается и применение отрезка профнастила.

В работе предложены и другие конструктивные решения тонкостенных балок, позволяющие приблизить несущую способность сечений к эпюре поперечных сил: балка с переменной перфорацией стенки (рис. 10 е), с переменным гофрированием и перфорацией стенки (рис. 10 к). Учитывая, что траектории главных сжимающих напряжений, провоцирующих потерю устойчивости плоской стенки, направлены по восходящим линиям, предложено для повышения жесткости стенки располагать ребра жесткости под наклоном по направлению действия главных сжимающих напряжений (рис. 10 и).

Назначение варьируемых параметров стенки – очень трудоемкий процесс: сперва надо задать переменный шаг ребер, затем вычислить величину приходящихся на каждый отсек усилий, после чего рассчитать несущую способность каждого отсека и сопоставить ее с воспринимаемым усилием. Априорное назначение переменного шага ребер приведет либо к недостаточной прочности некоторых отсеков, либо, напротив, к повышенному запасу прочности, а значит – перерасходу материала. При этом с ростом относительной высоты балки l/h_w растет и количество возможных комбинаций длин отсеков.

Для облегчения процедуры проектирования автором разработаны инженерные формулы, по которым назначаются относительные длины всех отсеков $\mu = a/h_w$ (где a – длина отсека), при которых сразу обеспечивается требуемая несущая способность каждого отсека без перерасхода стали (с рациональным запасом несущей способности). Для разработки формул установлены зависимости, которые позволили ответить на вопросы: насколько можно снизить сдвиговую прочность промежуточных отсеков по мере приближения к середине пролета? насколько нужно увеличить длину отсеков, чтобы достичь заданного понижения сдвиговой прочности?

Зависимость напряженного состояния отсека от его расположения в пролете. Из теоремы подобия треугольников (рис. 9 б) следует, что при равномерно-распределенной нагрузке в промежуточном k -ом отсеке действует усилие, равное:

$$Q_k = q \left(\frac{l}{2} - \sum_{i=1}^{k-1} a_i \right).$$

Величина действующего в отсеке усилия определяет требуемую несущую способность отсека. Так опорный отсек воспринимает поперечную силу, равную $Q_1 = q l/2$, и его прочность на сдвиг должна быть не менее:

$$Q_{u,1} = \frac{q l}{2 \cdot 0,95}.$$

Запишем, во сколько раз напряженное состояние k -ого отсека позволяет снизить его сдвиговую прочность по сравнению с прочностью опорного отсека:

$$\frac{Q_{u,k}}{Q_{u,1}} = 1 - \left(2 \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i \right) \left/ \left(\frac{l}{h_w} \right) \right.. \quad (6)$$

Рассмотрим напряженное состояние среднего n -ого отсека. Удлиненный отсек, находясь в середине пролета, помимо изгибных напряжений подвергается значительному действию сдвигающих сил. В соответствии с СП 16.13330 условие прочности такого отсека имеет вид: $(Q_n/Q_{u,n})^4 + (M_n/M_{u,n})^4 \leq 1$.

Из формулы (1) известно, что на предельный изгибающий момент $M_{u,n}$ не влияет расстояние между ребрами жесткости: основная часть изгибающего момента воспринимается поясами. Допустим, что пояса запроектированы с минимальным запасом прочности на изгиб $M_n/M_{u,n} = 0,90\dots 0,95$. Тогда доля сдвига, которую должен воспринять средний отсек, равна: $(Q_n/Q_{u,n})^4 = 1 - (0,90\dots 0,95)^4 = 0,04\dots 0,18$, а значит, длина среднего отсека должна быть такой, чтобы его сдвиговая прочность $Q_{u,n}$ удовлетворяла условию: $Q_n/Q_{u,n} \leq 0,60$. Максимальная поперечная сила в среднем n -ом

отсеке равна: $Q_n = q \mu_n l / 2 \left(\frac{l}{h_w} \right)$. Тогда известно, во сколько раз можно снизить сдвиговую прочность среднего отсека по сравнению с прочностью опорного отсека:

$$\frac{Q_{u,n}}{Q_{u,1}} = \mu_n \left(0,6 \cdot \left(\frac{l}{h_w} \right) \right).$$

Степень снижения прочности среднего отсека зависит от его собственной длины μ_n . Это связано с тем, что на величину поперечной силы Q_n влияет удаленность ребер жесткости от середины пролета. Для дальнейших вычислений введем понятие коэффициента пропорциональности, который характеризует степень приращения прочности на сдвиг n -ого отсека с поправкой на его собственную длину:

$$\chi_n = \frac{Q_{u,n}}{Q_{u,1} \cdot \mu_n} = 1,67 \left(\frac{l}{h_w} \right). \quad (7)$$

Влияние длины отсека на его несущую способность. Для набора эмпирических данных рассчитана несущая способность 1664 отсеков, каждый из которых отличается своей длиной, а также размерами и материалом стенки. Полученные данные разделены на группы по основным параметрам проектирования: каждый элемент в группе отличается друг от друга только длиной отсека. Таким образом, каждая группа условно иллюстрирует сочетание в единой балке отсеков разной длины.

Далее элементы каждой группы разбиваются по парам. Первый отсек в паре (более короткий) играет роль опорного отсека, его относительная длина обозначается μ_1 , а прочность на сдвиг – $Q_{u,1}$. Второй отсек в паре (более длинный) выступает в качестве промежуточного отсека – μ_i , прочность которого равна $Q_{u,i}$. Такая группировка позволила изобразить графически влияние размеров отсеков на разницу их прочности $Q_{u,i}/Q_{u,1}$ (рис. 11). Характер графиков указывает на связь величин степенной функцией вида:

$$\mu_i = a \cdot \left(\frac{Q_{u,i}}{Q_{u,1}} \right)^p, \quad \mu_i = b \cdot \chi_i^q. \quad (8)$$

Для определения аргументов и показателей степени функций (8) на основании эмпирических данных, в работе используется метод наименьших квадратов. По результатам вычисления регрессии установлены показатели степени приближающих функций: $q = -0,7$; $p = -2$. Влияние гибкости стенки и длины опорного отсека отражается аргументами a , b , для которых получены регрессионные зависимости:

$$\begin{aligned} a &= \mu_1 \left(9 \lambda_w 10^{-4} + 1,31 \right) + 0,0012 \lambda_w - 0,37; \\ b &= \mu_1 \left(0,66 - \lambda_w 10^{-3} \right) + 9 \lambda_w 10^{-4} + 0,36. \end{aligned} \quad (9)$$

Чтобы проанализировать, как гофрирование стенки на опорах влияет на полученные зависимости, рассчитана несущая способность гофрированных стенок, отличающихся друг от друга типом и размерами гофров (всего накоплено 3744 вариации прочности $Q_{u,1гофр}$). Составлены новые пары значений прочности $Q_{u,1гофр}$ и прочности промежуточных отсеков с плоской стенкой аналогичного сечения $Q_{u,i}$. Поскольку несущая способность гофрированной стенки определяется критическими

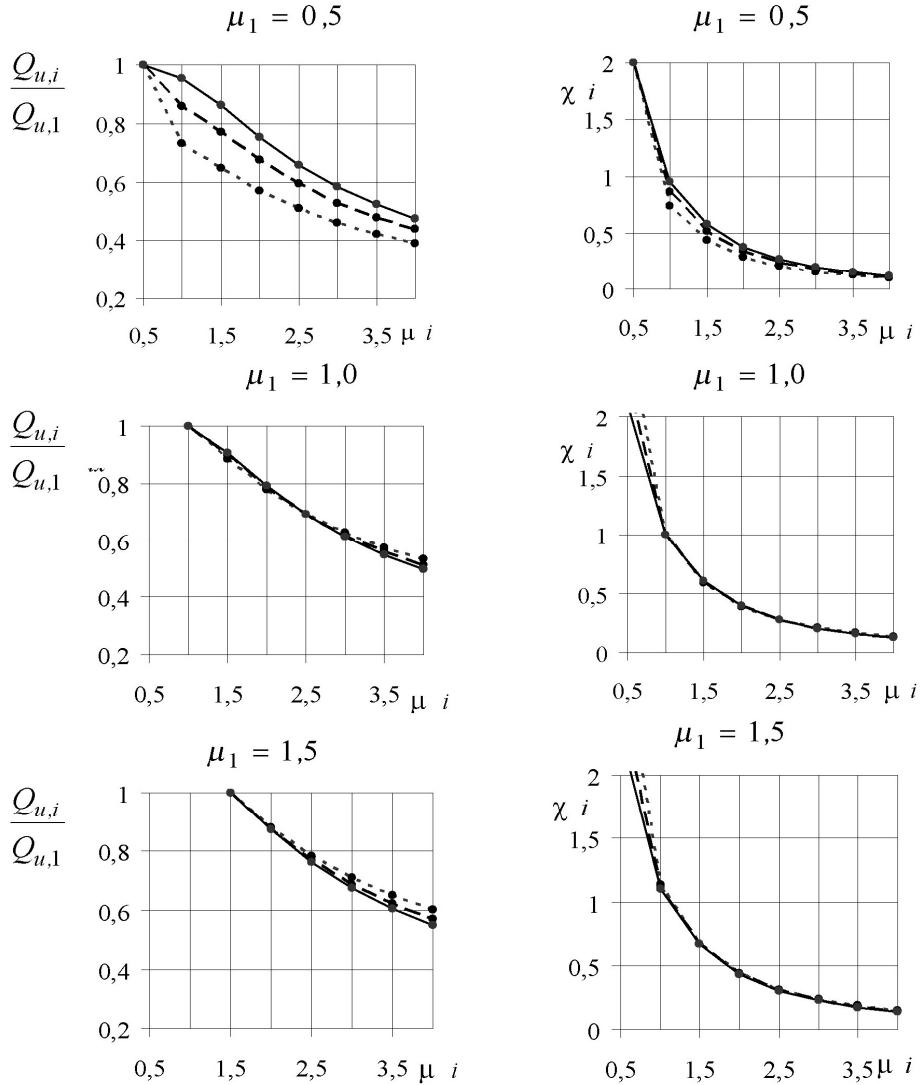


Рис. 11. Отношение прочности промежуточного i -ого отсека к прочности опорного отсека в зависимости от их размеров и гибкости стенки.

..... $\lambda_w=300$; — · — $\lambda_w=400$; — $\lambda_w=500$.

напряжениями $\tau_{\text{cr,loc}}, \tau_{\text{cr}}$, которые по-разному зависят от размеров стенки и параметров гофрирования, затруднительно подобрать общее уравнение регрессии, связывающее отношение $Q_{u,i}/Q_{u,1\text{гофр}}$ с размерами стенки и гофров. Взамен предлагаются определять аргументы в (8) по таблицам, которые приводятся в диссертации и методическом пособии по проектированию балок с варьируемой сдвиговой прочностью стенки.

Инженерные формулы получены путем подстановки выражений (6, 7, 9) в уравнения (8). Относительная длина среднего n -ого и промежуточного k -ого отсека назначаются равными:

а) для балок с плоской стенкой:

$$\mu_n = \frac{\mu_1 \left(0,66 - \frac{\lambda_w}{1000} \right) + 9\lambda_w 10^{-4} + 0,36}{\left(1,67 \sqrt{\frac{l}{h_w}} \right)^{0,7}}; \quad \mu_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \mu_i \left(9\lambda_w 10^{-4} + 1,31 \right) + 0,0012 \lambda_w - 0,37}{\left(1 - \left(2 \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i \right) \sqrt{\frac{l}{h_w}} \right)^2} \quad (10)$$

б) для балок с гофрами на опорах:

$$\mu_n = \frac{d}{\left(1,67/\frac{l}{h_w}\right)^{0,7}}; \quad \mu_k = \frac{c}{\left(1 - \left(2 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i\right) / \frac{l}{h_w}\right)^2}. \quad (11)$$

В четвертой главе приводится численное исследование НДС новых видов тонкостенных балок методом конечных элементов, излагаются теоретические основы МКЭ, обосновывается выбор вычислительного комплекса MSC Nastran.

Основными задачами исследования НДС тонкостенных балок с переменной длиной отсеков и с гофрированной на опорах стенкой явились: выявление особенностей предельного состояния; оценка предельной нагрузки и ее сопоставление с расчетным значением; сравнительный анализ НДС и предельной нагрузки новых конструктивных решений и традиционных аналогов с регулярной структурой.

Не каждый программный комплекс пригоден для анализа НДС гибких элементов в закритической стадии. Многие решатели не позволяют изменить линейную зависимость перемещений от нагрузки, а случай, когда узловые перемещения во много раз превышают толщину элемента, считается предельным состоянием. Из-за этого нельзя вычислить критическую нагрузку, соответствующую местной потере устойчивости стенки и проанализировать перераспределение напряжений в тонкой стенке после выпучивания.

ВК Nastran лишен перечисленных недостатков, в нем реализуется геометрическая нелинейность системы. Физическая нелинейность материала моделируется билинейной диаграммой Прандтля.

Для подтверждения достоверности результатов расчета ВК Nastran подробно рассмотрены и смоделированы натурные эксперименты трех тонкостенных балок, описанные в работах В.В. Каленова, Ю.Н. Симакова, А.Н. Степаненко (табл. 1). Внимание удалено именно этим моделям, поскольку они, являясь прототипами новых видов балок, демонстрируют особенности работы тонкой стенки, как разделенной на отсеки, так и без ребер жесткости, так и при поперечном гофрировании.

Для определения оптимальных параметров моделирования тонкостенных балок был произведен анализ сходимости результатов расчета МКЭ с экспериментальными данными. Сопоставлены вертикальные прогибы и горизонтальные перемещения стенки с соответствующими узловыми перемещениями КЭ моделей; компоненты напряженного состояния, предельная нагрузка, время счета.

Варьировался тип КЭ (плоский, объемный, параболический) и количество КЭ в сечении балки. Наилучшая сходимость наблюдалась при моделировании поясов и плоских стенок без учета погибей двумерными четырехугольными КЭ при разбиении пояса на 4 КЭ по ширине, а стенки – на 15 КЭ по высоте. Размеры КЭ назначались в пределах 10x10 – 20x20 см. Волнистую стенку следует представлять в виде системы оболочек из двумерных параболических КЭ. При этом геометрию поясов необходимо также описывать параболическими элементами для корректного описания линии контакта со стенкой.

Установлено полное совпадение деформированного вида численных и натурных моделей; значения параметров напряженного состояния сходятся удовлетворительно. Расхождение предельной расчетной и экспериментальной нагрузок $\Delta = 100\% (P_{\text{эксп}} - P_{\text{МКЭ}}) / P_{\text{МКЭ}}$ не превышает 16% (табл. 1).

Таблица 1. Параметры экспериментальных моделей балок.

| Модель | Марка | Материал | l , м | λ_w | P^{CHuP} , кН | $P^{\text{эксп}}$, кН | $P^{MK\mathcal{E}}$, кН | ΔP , % |
|---|-------------|--------------------------|---------|-------------|-----------------|------------------------|--------------------------|----------------|
| Реберная балка с гибкой стенкой В.В. Каленова | Балка ПС1 | Сталь СтЗпс | 18,0 | 533 | 71,3 | 78,0 | 70,0 | 11 |
| Балка с гибкой неподкрепленной стенкой Ю.Н. Симакова | Образец №4 | Сталь СтЗ | 18,0 | 300 | 29,4 | 30,0 | 28,0 | 7 |
| Балка с поперечно-гофрированной стенкой А.Н. Степаненко | Фрагмент Ф1 | Алюминиевый сплав АМг-2М | 3,4 | 167 | 52,6 | 58,0 | 50,0 | 16 |

Для вычислительного эксперимента запроектированы балки с переменным шагом ребер (табл. 2) и балки с гофрированной на опорах стенкой (табл. 3). Для каждой модели запроектирован аналог с постоянным шагом поперечных ребер жесткости и непрерывным гофрированием стенки.

При создании КЭ-моделей одна из опор устраивалась шарнирно-неподвижной (запрет линейных перемещений по вертикали и горизонтали), вторая опора оставалась подвижной (для исключения распора). Равномерно-распределенная нагрузка имитировалась сосредоточенными силами, прикладываемыми в узлах контакта стенки с поясом с шагом 1 м. Устойчивость верхнего сжатого пояса обеспечивалась запретом перемещений узлов из плоскости стенки на крайних гранях пояса в местах приложения узловых сил.

В результате расчетов установлено, что переменный шаг ребер жесткости способствует упорядочиванию формы растянутых складок в стенке в закритической стадии работы. По сравнению с балками с регулярной длиной отсеков, направление складок более выражено и четко соответствует нисходящей диагонали каждого отсека.

Таблица 2. Параметры балок с гибкой стенкой с переменным шагом ребер.

| Марка | l , м | q , кН/м | λ_w | Стенка $h_w \times t_w$, см | Пояс $b_f \times t_f$, см | Ребро $b_s \times t_s$, см | μ_1 | μ_2 | μ_3 | μ_n |
|-------|---------|------------|-------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| ПШ-6 | 6 | 33 | 300 | 85 x 0,28 | 20 x 0,50 | 7 x 0,50 | 0,8 | 1,5 | - | 2,4 |
| ПШ-18 | 18 | 12 | 400 | 120 x 0,30 | 28 x 0,80 | 8 x 0,60 | 1,0 | 1,7 | 2,8 | 4,0 |
| ПШ-30 | 30 | 12 | 500 | 180 x 0,35 | 42 x 0,80 | 10 x 0,70 | 2,0 | 2,2 | 2,8 | 3,0 |

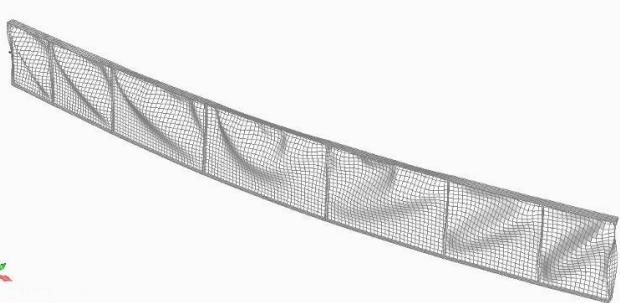


Рис. 12. Деформированный вид модели ПШ-18.

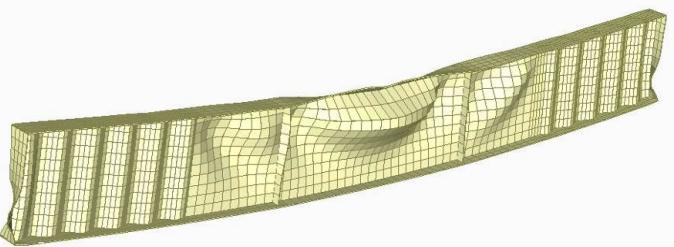


Рис. 13. Образование вспарщенных областей в гибкой стенке модели ГО-6.

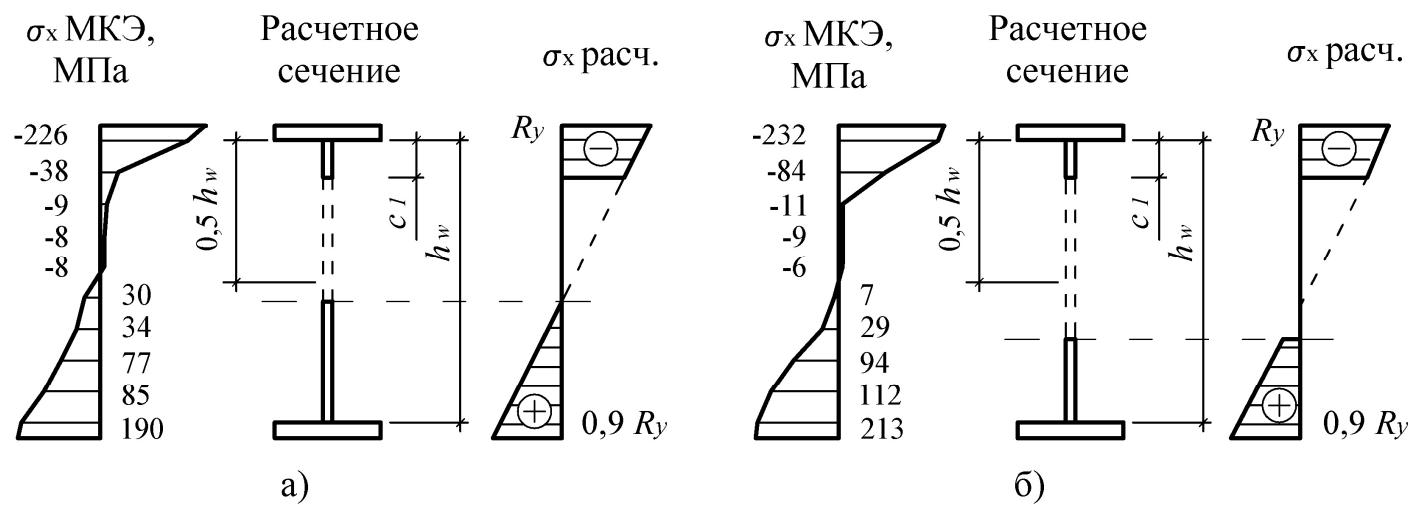
Таблица 3. Параметры балок с гофрированной на опорных участках стенкой.

| Марка | l , м | q , кН/м | λ_w | Стенка $h_w \times t_w$, см | Пояс $b_f \times t_f$, см | $\left(\frac{f}{a}\right)$ | $\left(\frac{f}{t_w}\right)$ | $\mu_1^{\text{гофр}}$ | μ_2 | μ_3 | μ_n |
|-------|---------|------------|-------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| ГО-6 | 6 | 54 | 300 | 75 x 0,25 | 18 x 0,80 | 0,2 | 10 | 1,9 | 1,0 | - | 2,2 |
| ГО-18 | 18 | 12 | 500 | 140 x 0,28 | 34 x 0,45 | 0,1 | 10 | 4,0 | - | - | 5,0 |
| ГО-30 | 30 | 54 | 300 | 200 x 0,65 | 47 x 2,80 | 0,1 | 5 | 3,7 | 0,8 | 1,5 | 3,0 |

Увеличенная длина среднего отсека приводит к повышенной деформативности тонкой стенки. Растет глубина образовавшихся выпучин, а также высота участка стенки, который выключается из работы после выпучивания. Нижняя граница выпучивания стенки смещается ближе к растянутому поясу. При этом высота участка стенки, образующего с верхним поясом тавровое сечение, которое воспринимает изгибающий момент, остается неизменной (рис. 15). Величина вертикальных прогибов в середине пролета балок с переменным шагом почти не отличается от прогибов балок с постоянным шагом.

Момент перехода тонкостенной балки в закритическую стадию работы зависит от жесткости опорного отсека. В балках с плоской стенкой при уменьшении длины опорного отсека для выпучивания стенки требуется достичь более высоких значений критических касательных напряжений. В балках с гофрированной на опорах стенкой плоская гибкая стенка удалена от опоры и для достижения критических касательных напряжений требуется более интенсивное нагружение. Эти обстоятельства приводят к запаздыванию перехода в закритическую стадию работы.

Результаты численных исследований позволяют утверждать, что характер распределения напряжений в элементах рассмотренных конструкций в целом не отличается от тонкостенных балок с постоянной длиной отсеков. Напряжения в гофрированных вставках развиваются также как и в балках с непрерывно гофрированной стенкой. Стенка на удалении от поясов $\approx 7 t_w$ почти не воспринимает нормальных напряжений, наблюдается равномерное распределение касательных напряжений по высоте стенки (рис. 16). В плоской стенке, примыкающей к отсеку с гофрированной стенкой напряжения развиваются также как в промежуточном отсеке балки с гибкой стенкой, подверженному совместному действию изгиба со сдвигом.

Рис. 15. Нормальные напряжения σ_x в среднем n-ом отсеке балки с гибкой стенкой:

а) с постоянным шагом ребер при относительной длине отсека $\mu = 1,0 \dots 2,0$;

б) с переменным шагом ребер при $2,0 < \mu_n \leq 5,0$.

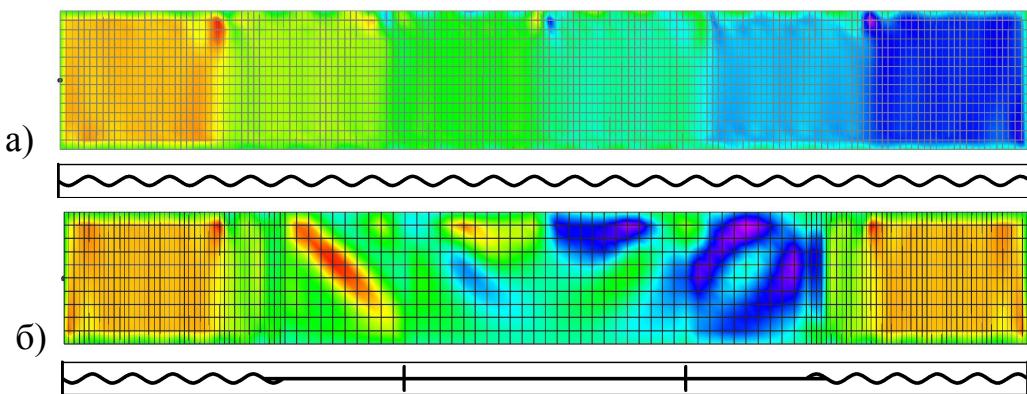


Рис. 16. Изополя касательных напряжений: а) в балке с непрерывно гофрированной стенкой; б) в балке с гофрированной на опорных участках стенкой.

Предложенный вариант узла сопряжения гофрированной и гладкой стенки (с нахлестом в один гофр) обеспечивает постепенную передачу усилий с опорного отсека на промежуточный. В расчетных моделях не отмечено критических концентраций напряжений в плоской стенке, способных спровоцировать образование пластических шарниров.

Конструктивные особенности новых видов тонкостенных балок следующим образом оказывают влияние на характер исчерпания несущей способности. При относительной длине опорного отсека с плоской стенкой $\mu_1 \geq 1,0$, механизм разрушения балки с переменным шагом ребер такой же, как у тонкостенной балки с регулярной длиной отсеков. Укороченный опорный отсек $\mu_1 < 1,0$ приводит к тому, что в поясах опорного отсека не успевают образоваться пластические шарниры, предельное состояние сопровождается потерей устойчивости сжатого пояса в середине пролета.

Гофрированные стенки в опорных частях продемонстрировали устойчивое поведение в предельном состоянии, что обеспечивается за счет углов поворота жестких опорных отсеков вокруг нормали к плоскости балки в сторону середины пролета (рис. 17). Исчерпание несущей способности наступает также вследствие достижения предела текучести в плоской стенке и потери устойчивости сжатого пояса в среднем отсеке.

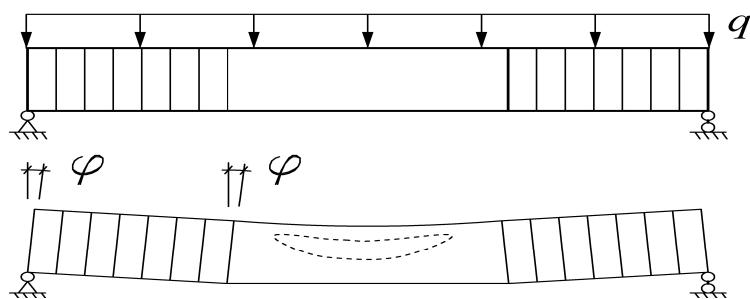


Рис. 17. Схема деформирования балки с жесткими опорными отсеками.

Предельная нагрузка новых видов балок, вычисленная по МКЭ, отличается не более чем на 9% от расчетной нагрузки по СНиП и методам Олькова-Степаненко, Острикова-Максимова. Это свидетельствует о корректности применения существующих методик для расчета несущей способности предложенных конструктивных решений. В целом результаты экспериментов свидетельствуют о хорошей совместной работе отсеков, обладающих разной несущей способностью, что указывает на корректность предложенных конструктивных решений, в которых несущая способность отсеков назначается в зависимости от приходящихся усилий.

В пятой главе обосновывается область эффективного применения тонкостенных двутавров с переменным шагом поперечных ребер и гофрированной на опорах стенкой в качестве однопролетных балок.

За коэффициент эффективности принята относительная разница заводской себестоимости сравниваемых аналогов:

$$\Delta C = \frac{C_{reg} - C_{var}}{C_{var}} \cdot 100\%,$$

где C_{reg} – себестоимость эталона – оптимальной тонкостенной балки с регулярными параметрами (постоянный шаг поперечных ребер, высота и длина волны гофров), определенными в результате параметрической оптимизации в главе 2;

C_{var} – себестоимость балки с варьируемой сдвиговой прочностью. Для определения себестоимости балок с гофрированной на опорах стенкой в формуле (5) вместо длины пролета использована суммарная длина опорных отсеков.

В расчетах рассмотрено по два варианта конструктивного исполнения балок:

а) балки с переменным шагом ребер:

- длина опорного отсека назначена равной длине отсеков эталона: $a_1^{var} = a_1^{reg}$;
- длина опорного отсека меньше длины отсеков эталона: $a_1^{var} < a_1^{reg}$.

б) балки с гофрированной на опорных участках стенкой:

- плоская стенка в средней части пролета не подкреплена ребрами;
- плоская стенка разделена поперечными ребрами жесткости на отсеки.

Из графиков на рис. 18-19 видно, что варьирование параметров отсеков позволяет сэкономить от 5 до 20% объема стали, причем наибольший эффект достигается в более нагруженных системах с большими пролетами. Замена в средней части пролета гофрированной стенки на плоскую позволяет добиться от 8 до 12% экономии стали за счет сокращения длины заготовки для стенки. Устройство поперечных ребер жесткости в средней части пролета снижает эффективность конструкции.

При расположении поперечных ребер с переменным шагом более эффективно предусматривать короткий опорный отсек, который обеспечит увеличение предельной равномерно-распределенной нагрузки.

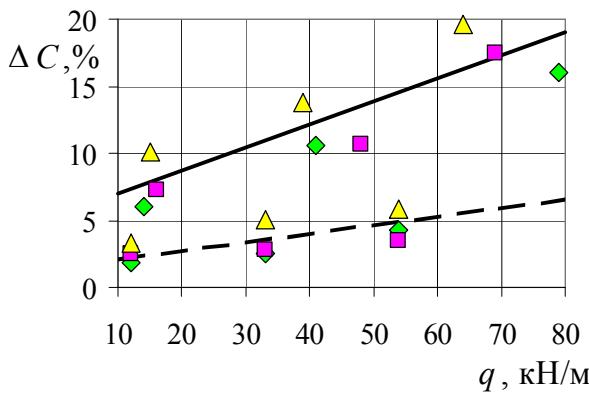


Рис. 18. Эффективность расположения ребер жесткости с переменным шагом.

— — — $a_1^{var} = a_1^{reg}$;
— — — $a_1^{var} < a_1^{reg}$.
◆ $l = 6 \text{ м}$;
■ $l = 18 \text{ м}$;
▲ $l = 30 \text{ м}$.

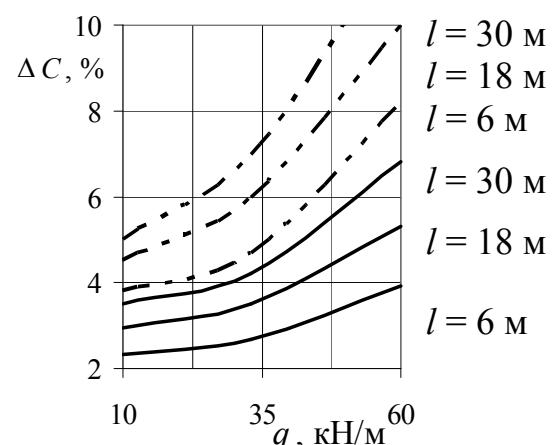


Рис. 19. Эффективность гофрирования стенки на опорных участках.

— — — ребра жесткости отсутствуют,
— — — плоская стенка подкреплена ребрами.

В приложении приводится методическое пособие «Проектирование стальных тонкостенных балок с варьируемой сдвиговой прочностью стенки», а также копии документов, свидетельствующих о внедрении основных результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе известных принципов развития технических систем получены новые конструктивные решения тонкостенных балок с варьируемой сдвиговой прочностью стенки:

- балки с гибкой стенкой с переменным шагом поперечных ребер жесткости;
- комбинированные балки, объединяющие гофрированные элементы на опорах и плоские – в середине пролета.

2. Основным преимуществом указанных конструкций является снижение веса до 20% за счет рационального расположения материала в соответствии с характером распределения внутренних усилий. Материал концентрируется в наиболее напряженных участках, а в местах, где напряжения малы (близки к нулю), излишние затраты сокращаются.

3. Установлена зависимость напряженного состояния отсека от его расположения в пролете. Определено влияние длины отсека на его несущую способность в зависимости от гибкости стенки, ее размеров и материала.

4. Разработаны инженерные формулы для определения размеров отсеков, при которых сразу обеспечивается несущая способность каждого отсека по длине пролета с учетом эпюры поперечных сил.

5. Дано развитие метода Я.М. Лихтарникова определения заводской себестоимости стальных конструкций для применения к балкам с гофрированной стенкой.

6. Разработана методика параметрической оптимизации тонкостенных балок двутаврового сечения с учетом выбора критерия оптимизации по весу, трудоемкости изготовления, заводской себестоимости с использованием алгоритма поэтапного отсеивания неоптимальных альтернатив.

7. Приведен анализ влияния класса стали, высоты балки, гибкости стенки, количества отсеков, размеров и формы гофров на вес, трудоемкость и заводскую себестоимость тонкостенных балок.

8. Определены граничные размеры гофров (длина и высота волны), при которых обеспечивается несущая способность гофрированной стенки в зависимости от толщины стенки и предела прочности стали на сдвиг.

9. Численным экспериментом с применением ВК Nastran на основе МКЭ изучено НДС предложенных конструктивных решений, выявлены отличия от известных тонкостенных балок.

Основные положения и выводы диссертации опубликованы в изданиях из Перечня ВАК Минобрнауки России:

1. Полтораднев А.С. Вариация прочности отсеков при проектировании балок с плоской и гофрированной тонкой стенкой // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. Архитектура. Строительство. Транспорт. – С.-Петербург: 2012. – №4. – с. 175-179;

2. Ольков Я.И., Полтораднев А.С. Актуальность и возможность исследования работы стальных балок с гибкой стенкой на основе численного моделирования // Academia. Архитектура и строительство. – М.: 2011. – № 2. – с. 95-99;

3. Ольков Я.И., Полтораднев А.С. Расчет эффективных стальных балок в России и Европе // Известия Юго-западного государственного университета. – Курск: 2011. – №5-2 (38). – с. 58-63;

4. Ольков Я.И., Полтораднев А.С. Металлическая двутавровая балка с вертикально гофрированной в опорных отсеках гибкой стенкой: патент 107219 РФ: МПК E04C 3/02 // опубл.: 10.08.2011. – Бюл. №22. – 2 с.;

Положения диссертации отражены также в других изданиях:

5. Полтораднев А.С. Параметрическая оптимизация стальных тонкостенных балок двутаврового сечения // Инженерные сооружения на транспорте. – М.: МИИТ, 2012. – вып. 4;

6. Ольков Я.И., Полтораднев А.С. Напряженно-деформированные и предельные состояния тонкостенных балок с определением оптимальных их параметров // Сборник докладов Международного конгресса «Наука и инновации в современном строительстве – 2012» Международной научно-практической конференции по научному направлению «Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения». – С.-Петербург: СПбГАСУ, 2012;

7. Полтораднев А.С. Структурный синтез при решении задач оптимизации на примере тонкостенных балок // Сборник трудов XV Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». – М.: МГСУ, 2012. – с. 178-182;

8. Полтораднев А.С. Зарубежные исследования стальных двутавровых балок с большой гибкостью стенки // Сборник трудов научно-практической конференции «Наука МИИТ – транспорту – 2010». – М.: МИИТ, 2010;

9. Полтораднев А.С. О синтезе структур при оптимальном проектировании // Сборник трудов научно-практической конференции «Наука МИИТ – транспорту – 2012». – М.: МИИТ, 2012;

10. Ольков Я.И., Полтораднев А.С. О различных способах расчета несущей способности балок с гофрированной стенкой // Сборник докладов международных академических чтений РААСН «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения». – Курск: 2011. – с. 120-131;

11. Полтораднев А.С. Тонкостенные металлические балки. Особенности конструктивного решения и расчёта // Сборник трудов научно-практической конференции «Наука МИИТ – транспорту – 2009». – М.: 2009. – с. VI-30-VI-31.

12. Полтораднев А.С. Эффективность балок с гибкой стенкой // Соискатель – Приложение к журналу Мир транспорта. – М.: 2010. – №1. – с.46-48.

Подписано к печати 04.12.2012

Формат бумаги 60x90/16

Объем – 1,5 п.л. Заказ № _____

Тираж – 100 экз.