

М 155221

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

В. И. ЖИЛЬЦОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КРУГОВЫМИ
ВЫРЕЗАМИ В СТЕНКЕ, ПРИМЕНЯЕМЫХ
В КРАНОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ

(05.186 — Подъемно-транспортные машины)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
доктор технических наук Б. С. Васильков.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук Г. И. Пшеничников,
кандидат технических наук В. Д. Бордюг.

Ведущее предприятие — ВНИИПТМАШ.

Автореферат 1972 г.

Защита 1972 г.
на заседании факультета
технического училища
им. Н. Э. Баумана (ул., 5).

С диссертацией по специальности МВТУ.

Ваш отзыв на диссертацию по печатию,
просим направить.

Ученый

К.

БОВ.

М155221

Развитие народного хозяйства, предусмотренное директивами XIV съезда КПСС, требует создания новых совершенных подъемно-транспортных машин, обеспечивающих механизацию производственных процессов. Новые задачи, возникающие при создании подъемно-транспортных машин, обслуживающих новые области науки и техники, приводят к новым решениям при конструировании машин.

Тонкостенные конструкции, состоящие из пластинок, образующих балки, стойки и другие конструктивные элементы, широко применяются в металлических конструкциях различных подъемно-транспортных машин.

Одним из основных элементов металлических конструкций подъемно-транспортных машин являются балки.

В ряде случаев стенки балок выполняются с отверстиями, обусловленными технологическими и эксплуатационными требованиями или с целью облегчения конструкции. Сплошность конструкции часто нарушается выкружками, отверстиями, лазами и т.д.

В стенках балки может быть выполнен ряд отверстий или одно отверстие. Эти отверстия часто подкрепляются ввариванием тонкостенного кольца, что уменьшает напряжения на контуре отверстия и обеспечивает местную устойчивость стенки. Такое решение позволяет отказаться от традиционного подкрепления при помощи ребер или диафрагм. Наличие отверстий, соизмеримых с высотой стенки, приводит к перераспределению как нормальных, так и касательных напряжений в элементах балки. Возле отверстий появляется зона концентрации напряжений, причем наибольшие из них могут в несколько раз превышать так называемые "средние напряжения". Недостаточное знание истинной картины напряженного состояния приводит к перетяжелению несущей конструкции или её разрушению.

Знание действительной картины напряженного состояния приобретает особое значение при расчете таких конструкций, а изучение концентрации напряжений возле отверстий представляет собой важную с теоретической и практической стороны задачу.

Проблеме концентрации напряжений уделяется большое внимание в мировой литературе. Задаче определения компонентов напряжений в элементах конструкций вблизи отверстия посвящено большое количество работ, использующих методы строительной механики или методы теории упругости и меньшее количество работ по экспериментальному исследованию.

Обзор и анализ полученных результатов позволяет считать, что в настоящее время относительно хорошо исследовано напряжен-

ное состояние пластинок с малыми отверстиями различных форм. Напряженное состояние пластинок с отверстиями сравнительно больших размеров, имеющих широкое практическое применение, изучено недостаточно. Еще меньшее количество работ посвящено исследованию балок, имеющих отверстия в стенках, хотя такой элемент конструкции широко применяется в авиации, судостроении, краностроении и других областях техники.

В настоящей работе проведены исследования с целью создания инженерного метода определения напряженного состояния в области немалого отверстия или ряда отверстий в стенках балок при действии поперечного изгиба на основе анализа существующих методов решения данной проблемы и экспериментального исследования.

Для теоретического исследования использованы известные решения математической теории упругости, использующие метод комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили как наиболее компактный. На основе проведенного анализа известные решения для малого кругового отверстия распространены, с некоторыми приближениями, на области, имеющие немалое отверстие. В работе проведено большое экспериментальное исследование тензометрическим методом. Исследована несущая способность стенок балок при различном их конструктивном оформлении и подкреплении.

Работа состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 177 страниц машинописного текста, 54 рисунка и 5 таблиц. Список использованной литературы включает 133 названия.

В первой главе проводится обзор существующих методов расчета. Известные методы расчета элементов конструкции в области вырезов подразделяются на:

1. Методы строительной механики,
2. Методы теории упругости,
3. Экспериментальные методы.

Методы строительной механики заключаются в следующем.

Из конструкции выделяются характерные, периодически повторяющиеся элементы, которые заменяются совокупностью балок. По правилам строительной механики находятся силовые факторы, действующие на эти элементы. Методами сопротивления материалов проводят расчет по сечениям.

Анализируя этот метод расчета, можно заметить, что достоинством его является учет условий статистического равновесия по сечениям, однако расчет имеет существенный недостаток, заключа-

ющийся в том, что сечения, по которым проводится расчет, во-первых, не отвечает принципу Сен-Венана, а во-вторых, не являются простым⁴, для которых формулы сопротивления материалов оставались бы справедливыми.

Методы теории упругости. Работу составного сечения балки можно оценить, используя методы теории упругости.

Задаче о распределении напряжений вокруг отверстия посвящено большое количество работ. Основные результаты получены советскими учеными и приведены в монографиях Н.И.Мусхелишвили; Г.Н.Савина; Н.П.Флейшмана; М.П.Шереметьева; в обзорах Д.Н.Шермана и Э.И.Григолюка, Л.А.Фильштинского.

Большинство задач о распределении напряжений вокруг отверстия решены точно для бесконечных областей. Исследованию двусвязных конечных областей посвящено меньшее количество работ, причем получены лишь приближенные решения. Возникает вопрос, в каких случаях решения, полученные для бесконечных областей, можно применить для конечных областей?

Другими методами расчета пластинок конечных размеров являются метод электромоделирования и метод релаксации при густой сетке. В этих задачах предполагается, что граничные условия заранее известны.

Рассматриваемая нами задача осложняется наличием развитых поясов балки, что вносит существенные особенности в расчет пластин составного сечения. Так граничные условия для отдельных пластин, составляющих сечение, нельзя в этом случае определить используя формулы элементарного изгиба.

Метод решения задач для неограниченной плоскости обычно сводится к следующему.

Компоненты напряженного состояния плоскости, ослабленной отверстием, обычно представляются в виде суммы компонентов основного напряженного состояния пластинки и дополнительных компонентов, возникающих благодаря наличию отверстия. Причем последние являются самоуравновешенными для неограниченной пластинки и по мере удаления от отверстия быстро затухают.

В случае пластин конечных размеров дополнительные компоненты не затухают в пределах пластины и, таким образом, не являются самоуравновешенными и, следовательно, должны отвечать условиям статики, т.е. влиять на "основное напряженное состояние". Считается, что вопрос о том, при каких соотношениях размеров

отверстий и пластинок получение решения для бесконечно-протяженных областей можно считать достаточно точными, решается экспериментальным путем.

Крановые металлические конструкции работают в области упругой работы материала, поэтому обратимся к известным результатам линейной теории упругости в её классической постановке.

Рассматривая основное напряженное состояние элементов балки, полагаем, что при достаточно мощных поясах и тонкой стенке основную долю момента воспринимают полки, а поперечную силу — стенки. Эпюра распределения касательных напряжений по высоте балки близка к прямоугольнику.

Таким образом основное напряженное состояние стенки балки в поясах сводится к напряженному состоянию, вызванному изгибающим моментом, и напряженному состоянию, близкому к чистому сдвигу.

Во второй главе анализируется распределение напряжений в плоском изотропном поле, ослабленном круглым отверстием или рядом отверстий. Рассматривается решение для сдвига бесконечной плоскости с отверстием, решение задачи изгиба полосы (балки) с одним отверстием, полученное Г.Н.Савиным, Н.И.Мухелишвили, А.С.Локшиным, З.Туци, и решение для случая изгиба балки-полоски постоянной поперечной силой, полученное А.С.Локшиным, С.Г.Лехницким, М.И.Найманом, Г.Н.Савиным.

Расчленив напряжение σ_θ на контуре отверстия на две составляющих: $\sigma_\theta^{(M)}$ — вызванной действием изгибающего момента и $\sigma_\theta^{(Q)}$ — вызванной действием поперечной силы и сравнив последнее решение с двумя первыми, показывается, что они на контуре малого отверстия совпадают. Поэтому дальнейшее исследование ориентируется на задачи чистого изгиба балки-полоски и чистого сдвига, причем последний случай является наиболее опасным для тонкостенных конструкций в смысле концентрации напряжений.

Приближенное теоретическое решение задачи о напряженном состоянии при сдвиге пластинки стенки балки, имеющей одно или ряд отверстий, предложено С.К.Вангом. Методом последовательных приближений, разработанным Р.С.Хаулендом, решается задача о чистом сдвиге полосы с круговым отверстием в предположении, что стороны пластинки нагружены постоянными касательными напряжениями. Эта задача является одной из немногих задач для конечных областей, решение которой доведено до конца.

Однако практическая ценность решения С.К.Ванга невелика, т.к. нами установлено, что касательные напряжения по сторонам стенки далеко не постоянны, а для отверстий, диаметр которых более половины высоты балки, даже меняют знак.

Случай ослабления одинаковыми отверстиями упругой плоскости рассматривался рядом авторов.

Распределение напряжений в упругой пластинке с двумя отверстиями рассматривали С.Линг, Н.А.Саврук. При решении задачи применялись биполярные координаты.

Чистый изгиб и чистый сдвиг пластинки с двумя круговыми отверстиями, нагруженной на бесконечности, рассмотрен А.С.Космодамианским и В.Н.Ложкиным.

Напряжения в бесконечной упругой плоскости, ослабленной рядом отверстий, в случае чистого сдвига рассматривали М.Исида, В.И.Маховиков. Случай чистого изгиба рассмотрен К.И.Шульцем. Решения этого класса задач получены различными методами, основанными на разложении искомого в ряд. Отмечается, что сходимость рядов существенно зависит от величины относительного размера области. При достаточно удаленных границах ряды обычно сходятся хорошо. При весьма близких границах сходимость рядов резко ухудшается, а в некоторых случаях ряды расходятся.

В последнее десятилетие внимание исследователей было обращено к использованию моментной теории упругости. Использование этой теории дает меньшие коэффициенты концентрации напряжений.

Задача о чистом изгибе плоскости, ослабленной круговым отверстием, дана Ю.Н.Немишем. Задача изгиба консольной балки с круговым отверстием постоянной поперечной силой решена Ю.Н. Немишем и В.П.Третьяком. Из этих решений вытекает вывод, что моментная теория упругости дает существенные поправки к решениям классической теории упругости для тех случаев, когда напряженное состояние имеет наибольший градиент напряжений, т.е. для случаев отверстий соизмеримых с изгибно-крутильным модулем

ρ . Для случаев, когда радиус отверстия $R \gg \rho$, эти поправки невелики, а в пределе при $R/\rho \rightarrow \infty$ эти решения совпадают.

В третьей главе исследуется напряженное состояние элементов балки с развитыми поясами в зоне неподкрепленных круговых вырезов в стенке. Рассматривается силовое взаимодействие между элементами двутавровой балки при нагружении её внешними силовыми факторами - изгибающим моментом и поперечной

силой. Нагрузка приложена в плоскости стенки. Стенка балки имеет ряд одинаковых круговых вырезов, центры которых совпадают с нейтральной осью балки. Расстояние между отверстиями равно ℓ . Каждый из элементов стенки и полки рассматривается как находящийся в условиях плоского напряженного состояния. Взаимодействие между стенками и полками выражается в возникновении погонных касательных усилий q , которые могут быть определены из условия тождественности деформаций удлинения стенки и полки. В точной постановке решение этой задачи представляет большую трудность.

Задача упрощается, если учесть геометрическую и силовую симметрию. Опираясь на принцип независимости действия сил и ранее проведенный анализ известных решений задач теории упругости, при заданной системе нагрузок суммарное напряженное состояние рассматривается отдельно как напряженное состояние, вызванное действием изгибающего момента, и напряженное состояние, вызванное действием чистого сдвига. За расчетный изгибающий момент принимается момент действующий в поперечном сечении, проходящем через центр отверстия.

Рассматривается характерный повторяющийся элемент — стсек, ограниченный сечениями, перпендикулярными оси балки и отстоящими на расстоянии $\ell/2$ от центра отверстия. Используя идеи Ю.Н. Шиманского, отделив полки от стенки и заменив их взаимодействие статически эквивалентной системой сил, расчет стенки сводится к расчету прямоугольной пластинки конечных размеров с отверстием, загруженной по контуру некоторыми касательными и нормальными напряжениями.

Решение задачи для выделенной таким образом двухсвязной области само по себе представляет значительные математические трудности.

Дальнейший анализ напряженного состояния ведется следующим образом. Полагаем, что уравнения, полученные при решении задачи для бесконечной пластинки с отверстием, загруженной на бесконечности определенной системой усилий, с достаточной степенью точности, по крайней мере вблизи отверстия, отражают характер распределения компонентов напряжений по исследуемому сечению. При этом предполагаем, что величина заданных усилий на бесконечности заранее неизвестна.

Величина ординат компонента напряжений находится исходя из интегрального равновесия внутренних силовых факторов и внешней нагрузки. Результаты такого расчета оцениваются экспери-

ментально.

Напряженное состояние стенки в случае чистого сдвига оценивается на основе известного решения пластинки с отверстием, нагруженной на бесконечности касательными напряжениями τ .

Показано, что неподкрепленное отверстие диаметром большим трети высоты вызывает перераспределение напряжений во всех элементах балки на расстоянии половины высоты балки по обе стороны от оси отверстия.

При исследовании напряженного состояния стенки вблизи отверстия рассматривается отсек, срединная плоскость которого — xOy , а начало координат совпадает с центром отверстия.

Для балок с параллельными поясами получены следующие результаты.

В поперечном сечении стенки, проходящем через центр круглого отверстия, распределение напряжений τ_{xy} в широком диапазоне соотношений D/H описывается уравнением, соответствующим решению для пластинки с отверстием, нагруженной на бесконечности чистым сдвигом. Напряжение τ_{xy} на уровне сопряжения стенки с полкой подсчитывается по формуле

$$\tau_{on} = \frac{Q}{H\delta\kappa_\tau\left(1 - \frac{1}{v}\right)}, \quad (I)$$

где Q — поперечная сила, H — высота балки, δ — толщина стенки, $v = \frac{H}{D}$ — параметр, характеризующий размер выреза,

D — диаметр отверстия, κ_τ — коэффициент полноты эпюры, вычисляемый по формуле

$$\kappa_\tau = \frac{v^2 + v}{v^2 + 3}.$$

Распределение напряжений τ_{xy} по оси балки определяется аналогичным образом. Для $x = \frac{\rho}{2}$ напряжения τ_{xy} подсчитываются по формуле (I), положив $v = \frac{\rho}{D}$.

Значение коэффициента κ_τ , определенного экспериментально в диапазоне $\frac{D}{H} = 0,3 + 0,6$, совпадает с теоретическим с точностью до 2%.

Распределение напряжений τ_{xy} в стенке по контуру выделенной прямоугольной области с отверстием получено в виде

$$\tau_{xy} = \frac{Q}{H\delta} \left\{ \left[\frac{1}{\kappa_\tau\left(1 - \frac{1}{v}\right)} - \gamma \right] \cos^2 2\theta + \gamma \right\}, \quad (2)$$

где $\delta = I,75I \frac{\nu^2 - 1}{\nu^2 + 3} - 0,75I$ - коэффициент, характеризующий эпшору τ_{xy} ; $\theta = \arctg \frac{2x}{\rho}$ при $\ell < H$ и $\theta = \arctg \frac{2x}{H}$ при $\ell > H$ - для сечения по границе сопряжения стенки с полкой или $\theta = \arctg \frac{2x}{H}$ - для поперечных сечений симметричных относительно центров отверстий.

Полученный таким образом закон распределения касательных напряжений по контуру выделенной части стенки (отсека) подтверждается экспериментом и в значительной степени отличается от определяемого по теории элементарного изгиба, принятого в исследованиях К. Ванга.

Точное решение рассматриваемой области при полученных граничных условиях достаточно сложно. Поэтому максимальные напряжения σ_θ по контуру отверстия определялись на основании тщательного тензометрического обследования модельных балок.

На основе данных эксперимента предложена следующая формула для определения $\sigma_\theta^{(q)}$ по контуру отверстия

$$\sigma_\theta^{(q)} = -4 \tau_{cp} \sin 2\theta, \quad (3)$$

где $\tau_{cp} = \frac{Q(2\nu-1)}{H\delta(\nu-2)}$ - среднее напряжение сдвига.

Формула (3) подтверждена экспериментом для $\frac{D}{H} \leq 0,6$ в широком диапазоне соотношений площадей поясов и стенки. Разница экспериментальных и подсчитанных по формуле значений $\sigma_{\theta \max}^{(q)}$ не превышала 5%.

Влияние шага отверстий оценено экспериментальным путем. Исследован диапазон $0,8H \leq \ell \leq \infty$.

В результате тензометрического обследования получены следующие выводы.

1. В случае одного круглого отверстия формулы (1), (2), (3) остаются справедливы.

2. При сближении отверстий, выполненных с одинаковым шагом, касательные напряжения τ_{xy} в перемычках между отверстиями быстро возрастают при $\frac{D}{\ell} > 0,5$.

3. Распределение τ_{xy} в диаметральной поперечном сечении стенки практически не зависит от $\frac{D}{\ell}$.

4. Распределение $\sigma_\theta^{(q)}$ по контуру отверстия, при $\ell < H$ с точностью до 5% описывается формулой (3), при этом следует подставлять значение $\nu = \frac{\ell}{D}$.

5. При сближении отверстий $\frac{D}{\ell} > 0,65$ максимум σ_θ , согласно решению А.С. Космодамианского и В.Н. Ложкина, несколько смещается к оси балки. Смещение ощутило лишь при значительном

сближении отверстий, но такие конструкции, в силу высокой концентрации напряжений, применять не рекомендуется.

Неравномерность распределения касательных сил по линии сопряжения полки со стенкой вызывает неравномерность распределения нормальных напряжений σ_x по сечению полки и приводит к её местным перенапряжениям. При исследовании работы полок консольной балки получены следующие выводы.

1. Величина напряжений σ_x в полках в поперечном сечении, проходящем через центр отверстия, и сечениях, проходящих между отверстиями на расстоянии, равном половине шага отверстий при $l \leq H$, может быть подсчитана по формуле элементарного изгиба для сечения брутто.

2. Между указанными выше сечениями имеются местные максимумы и минимумы напряжений σ_x при постоянной поперечной силе.

Используя уравнение (2) и выводы П.Ф.Папковича, полученные при решении задачи о полезной ширине полок, мы получили следующее выражение для определения местных максимумов

$$\sigma_{max} = \sigma_0 + q_0 \left[(1-\gamma) \frac{0,1035l}{F_n} + (1+\gamma) \frac{0,386l}{\delta_n} \right], (4)$$

где σ_0 - напряжение σ_x в полке, вычисленное в сечении по отверстию; $q_0 = \tau_{0n} \cdot \delta$ - погонное сдвигающее усилие в сечении по отверстию; F_n , δ_n - площадь и толщина полки.

Вышеуказанные максимумы и минимумы находятся на расстоянии $\pm 0,103 l$.

Зона действия дополнительных напряжений для балок с одним круговым неподкрепленным отверстием ограничивается расстоянием $\pm \frac{H}{2}$, отсчитываемым от оси отверстия.

Указанные выше дополнительные напряжения опасны, в смысле прочности полок, в коротких консольных балках и тем опаснее, чем больше ширина полки (при $B_n > \frac{1}{6} H$ или $B_n > \frac{1}{6} l$).

В результате исследования напряженного состояния элементов балки при воздействии чистого изгиба, получены следующие результаты.

Распределение напряжений $\sigma_\theta^{(M)}$ вокруг отверстия в диапазоне $0 < \frac{D}{H} < 0,6$ хорошо описывается формулой, полученной при решении задачи о чистом изгибе полосы (балки)

$$\sigma_\theta^{(M)} = \frac{MR}{\gamma} (\sin \theta - \sin 3\theta), \quad (5)$$

В случае немалого отверстия возникает вопрос о способе вычисления момента инерции в ослабленном сечении, т.к. в этом случае при изгибе сечения не остаются плоскими. Предлагается вводить приведенный момент инерции стенки, вычисляемый с учетом распределения напряжений в диаметральном сечении.

$$J_{np} = J_{cm} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{6}} \right), \quad (6)$$

где J_{np} - приведенный момент инерции, J_{cm} - момент инерции стенки по неослабленному сечению.

В случае чистого изгиба, в зоне отверстия, в сечении стенки по нейтральной оси балки, возникают касательные напряжения τ_{xy} , величина которых не превышает 19% от $\sigma_b^{(M)} \max$. В случае ряда отверстий, расположенных с шагом ℓ в точке $x = \frac{\ell}{2}$ эти напряжения равны нулю, а их максимальное значение уменьшается при сближении отверстий.

В четвертой главе дается краткий обзор состояния экспериментальных исследований по определению распределения напряжений около отверстий в стенках балок и основные результаты этих исследований.

Описываются эксперименты, проведенные автором. Приводятся данные, полученные в результате этих экспериментов.

Сопоставляются теоретические и экспериментальные данные, что позволяет оценить степень точности и определить область практического применения полученных расчетных зависимостей.

Анализируется напряженное состояние колец-обечаек, подкрепляющих круглые вырезы в стенке, и их влияние на напряженное состояние элементов балки.

Приводятся данные эксперимента по определению несущей способности балок по условию прочности и, частично, устойчивости для балок при различном конструктивном оформлении и подкреплении стенки.

Экспериментальное исследование выполнено в лаборатории кафедр подъемно-транспортных машин МВТУ им.Баумана. Для экспериментов использовано 16 модельных балок, выполненных из стали Ст.3. Конструкция модели представляла собой двухконсольную балку высотой 400 мм и длиной 6000 мм., опирающуюся по концам и нагружаемую двумя одинаковыми силами в специальном стенде, гидроцилиндры которого питались через стабилизирующее устройство от испытательной машины. Величина прикладываемой нагрузки контролировалась образцовым динамометром.

Исследование напряженно-деформированного состояния проводилось электротензометрическим методом. Для измерения деформаций применялись проволоочные тензодатчики с базой 10 и 20 мм, датчики наклеивались с двух сторон исследуемых элементов. При регистрации показаний тензодатчиков аппаратурная погрешность не превышала $2 \cdot 10^{-6}$ единиц деформации. Нагрузка, необходимая для снятия данных, прикладывалась ступенями. После регистрации показаний, необходимых для построения эпюр по сечениям, нагружение продолжалось до потери несущей способности модельной балки.

Регистрировалась нагрузка потери устойчивости стенки и её поведение в закритической области работы. Формы потери устойчивости изучались методом "Отраженная сетка" и замером перемещений стенки при помощи рамок с индикаторами часового типа.

Исследованы случаи чистого изгиба и случай поперечного изгиба.

Случай поперечного изгиба подвергнут наиболее тщательному экспериментальному исследованию.

Приводятся данные эксперимента по распределению напряжений в элементах балки в случае подкрепления отверстия кольцами - обечайками. Рассматривается подкрепление одностенчатой и двухстенчатой балки. Показано, что тангенциальные напряжения в подкрепляющем кольце распределяются неравномерно по ширине (из плоскости стенки). Для оценки подкрепляющего действия кольца предлагается вводить приведенное сечение обечайки, причем для испытанных соотношений эффективная ширина составляла 5,5+6,5 толщин обечайки.

Даются рекомендации для определения эффективной площади кольца.

Рассматривается влияние подкреплений в виде обечайки на напряженное состояние стенки и полок балок.

Показано, что подкрепляющее кольцо снижает значение максимальных напряжений $\bar{\sigma}_\theta$ по контуру отверстия и несколько уменьшает концентрацию напряжений τ_{xy} вблизи поясов и в перемычке между отверстиями.

При увеличении жесткости подкрепляющего кольца наблюдается концентрация напряжений τ_{xy} вблизи кольца-обечайки. Приводятся основные результаты, характеризующие подкрепляющее действие колец-обечаек, полученные при испытании.

Показано, что такое подкрепление практически не компенси-

рует ослабление стенки в диаметральном сечении по отверстию при работе на сдвиг.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных.

Значения коэффициентов концентрации и эпюр напряжений, полученных экспериментальным путем, сопоставлены с результатами теоретического решения задачи о чистом изгибе и поперечном изгибе балки с развитыми поясами. Расчет проводился по предложенным нами формулам. Экспериментальные точки нанесены на графики, характеризующие распределение напряжений по сечениям, и на контуре отверстий в безразмерных параметрах.

Особое внимание уделено окружным напряжениям $\sigma_{\theta}^{(q)}$, возникающим при поперечном изгибе. Зависимость (3) и эксперимент имеют хорошую сходимость. Величина σ_{θ} , подсчитанная согласно решению С.К.Ванга является завышенной.

Сравнение значений максимального напряжения $\sigma_{\theta \max}$, полученного при решении задачи о чистом сдвиге на бесконечности изотропной плоскости, ослабленной рядом круговых отверстий, выполненной М.Исида, дает хорошее совпадение для отношения $\sigma_{\theta}/\tau_{\theta\rho}$ рассматриваемого случая.

Сопоставление и анализ свидетельствует о том, что расчетные зависимости, представленные нами в главе III, совпадают с большой точностью с результатами эксперимента для наиболее часто встречающихся на практике соотношений размеров элементов балки, диаметра круговых вырезов и их шага.

Приводятся результаты исследования несущей способности 16 модельных балок при поперечном и чистом изгибе по условию прочности и устойчивости.

Показано, что при чистом изгибе отверстия в стенках размером $D < 0,5H$ и шагом $\ell > H$ практически не снижают несущей способности балки, которая лимитируется в этом случае прочностью и местной устойчивостью поясов. Подкрепляющее кольцо-обечайка улучшает условия работы элементов балки.

При исследовании работы стенок, нагруженных поперечной силой, получены следующие результаты.

Несущая способность стенок с неподкрепленным отверстием $\frac{D}{H} = 0,3 + 0,6$ исчерпывается для относительно толстых стенок ($\frac{H}{\delta} < 80$) при достижении напряжениями $\sigma_{\theta \max}$ предела текучести, а при $\frac{H}{\delta} > 130$ - по условию местной устойчивости стенки вблизи контура отверстия.

Подкрепление отверстия кольцом-обечайкой снижает напряже-

ния σ_0 , и обеспечивает устойчивость неподкрепленной кромки отверстия. Несущая способность стенки исчерпывается по условию сдвига в ослабленных сечениях стенки или по условию местной устойчивости стенки в зоне максимальных касательных напряжений (по оси балки). При недостаточной площади подкрепляющего кольца лимитирующими являются напряжения σ_0 .

Анализ работоспособности стенок с различным конструктивным оформлением показывает, что стенки с неподкрепленными отверстиями работоспособны при низких напряжениях среза.

Стенки, имеющие ряд подкрепленных кольцами-обечайками отверстий определенного диаметра и шага, для относительно тонких стенок эквивалентны по работоспособности стенкам, подкрепленным поперечными ребрами при эквивалентном или лучшем весовом соотношении.

В пятой главе приводятся рекомендации по конструированию и расчету балок, имеющих круговые отверстия в стенке, рассматриваются весовые характеристики стенок, имеющих ряд неподкрепленных и подкрепленных отверстий.

На основе полученных автором зависимостей даются итоговые расчетные формулы для проверки местной прочности стенки и её соединения с полками.

Выводы

Проведенное теоретическое и экспериментальное исследование составных балок, имеющих неподкрепленные и подкрепленные круговые вырезы в стенках, позволило установить следующее:

1. Круговые вырезы диаметром более трети высоты балки, вызывают существенное перераспределение напряжений во всех элементах составного сечения в области выреза.

2. В этом случае несущая способность балки в целом может регламентироваться локальной прочностью или устойчивостью элементов составного сечения вблизи выреза.

3. Разработанная методика расчета обеспечивает простое вычисление компонентов напряженного состояния вблизи круговых неподкрепленных вырезов в стенках балок, позволяет выявить влияние размеров круговых вырезов и расстояния между ними на распределение нормальных и касательных напряжений, оценить подкрепление выреза кольцом-обечайкой и определить напряжения в опасных точках конструкции.

4. Неподкрепленный круговой вырез, соизмеримый с высотой стенки, в значительной степени снижает несущую способность при поперечном изгибе и в меньшей степени при чистом изгибе.

5. Подкрепление кругового выреза кольцом-обечайкой умень-

шает напряжения на контуре отверстия, но не компенсирует ослабление стенки по срезу.

6. Подкрепляющее вырез кольцо-обечайка при определенной жесткости обеспечивает местную устойчивость стенки. Такое подкрепление эквивалентно подкреплению стенок ребрами для относительно тонких стенок ($\frac{H}{\delta} > 100$).

7. Расчетное определение напряжений и сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными показали достаточно хорошее совпадение.

8. Проведенное исследование позволило получить рекомендации по конструированию и расчету балок с круговыми вырезами в стенках применительно к крановым стальным металлическим конструкциям.

Основное содержание диссертации отражено в следующих печатных работах:

1. Жильцов В.И. Особенности напряженного состояния балок с развитыми поясами в зоне отверстий в стенке. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № I, 1969.

2. Жильцов В.И. Несущая способность стенок балок при различных их подкреплениях. Труды Первой всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин. Том II. ВНИИМЕТМАШ Сб. № 24, М., 1969.

Основные положения работы были доложены на конференциях:

1. Первой всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин. Колпино, апрель 1966.

2. II конференции молодых научных работников и аспирантов ЦНИИСК им.Кучеренко, 1966.

3. Юбилейной конференции конструкторско-механического факультета МВТУ им.Баумана, Москва, апрель 1970.

