

*На правах рукописи*



Грачев Алексей Андреевич

**УСТОЙЧИВОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРАНОВЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность **05.05.04** -

Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

<b>Научный руководитель:</b>	доктор технических наук, профессор <b>Соколов Сергей Алексеевич</b>
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Липатов Анатолий Степанович</b> доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» кафедры «Подъемно-транспортные системы»
	<b>Ватулин Ян Семенович</b> кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «ПГУПС», заведующий кафедрой «Автоматизированное проектирова- ние»

Ведущая организация: ЗАО «ПО Технорос», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «16» апреля 2013г. в 16-00 часов. на заседании диссертационного совета Д 212.229.24 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая, ул., д. 29, корпус 1, ауд.41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «15»марта 2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



**Бортяков  
Данил Евгеньевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационного исследования.** В современных грузоподъемных машинах широко используются сварные тонкостенные корбчатые конструкции, обладающие высокой жесткостью при кручении и прочностью при пространственном нагружении. Стремление к снижению массы таких конструкций приводит к увеличению габаритов сечений и снижению толщин. Это в свою очередь ведет к тому, что важнейшим условием работоспособности конструкции является критерий местной устойчивости ее элементов. Основным методом обеспечения устойчивости пластин, связанным с минимальным повышением металлоемкости, является установка ребер.

Обзор имеющейся литературы и нормативно-технических материалов показал, что в настоящее время нет эффективного инженерного аппарата для обеспечения местной устойчивости элементов тонкостенных конструкций на стадии проектирования. В частности существующие подходы не отражают специфику многовариантного пространственного нагружения крановых конструкций, нет методик рационального ребрения пластин и прогнозирования устойчивости пластин с ребрами. Кроме того, отсутствуют оценки влияния неплоскостности пластин, возникающей в результате сварочных поволодок, на их поведение и напряженно-деформированное состояние конструкции в целом.

**Целью диссертационного исследования является:** совершенствование методов обеспечения местной устойчивости элементов крановых конструкций на стадии проектирования.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **основные задачи:**

1. Проведено численное исследование влияния смежных элементов на устойчивость пластины в составе конструкции и разработана инженерная методика учета влияния данного фактора.

2. Проведено численное исследование поведения пластин с ребрами и разработана инженерная методика расчета на устойчивость пластины с ребрами при различных условиях нагружения и размещения ребер. Разработаны рекомендации по определению рациональных геометрических параметров ребер и их расстановке.

3. Проведено численное исследование поведения неплоских пластин в составе конструкции в зависимости от параметров кривизны исходной срединной поверхности и условий нагружения. Проанализировано влияние неплоскостности на распределение напряжений по сечению балки и разработаны рекомендации по учету данного фактора при проектировании конструкций. Даны рекомендации по максимальной допустимой степени искривления элементов балки в зависимости от геометрии конструкции и условий нагружения.

4. Выполнено экспериментальное исследование на стальной модели для подтверждения адекватности принятых допущений и предложенных расчетных методик.

**Методологической и теоретической основой исследования** являются известные решения теории упругости, использованные для создания аналитических методик, а также методология численного (метод конечных элементов) и физического эксперимента.

**Достоверность результатов**, полученных в работе, базируется на использовании базовых трудов российских и зарубежных ученых в области теории упругости и анализа местной устойчивости элементов конструкций, применении лицензионного программного обеспечения для конечно-элементного моделирования (NEiNastran 9.1). Результаты исследований подтверждены данными тензометрических исследований сварной металлической модели.

**Научную новизну** работы составляют:

– результаты комплексного конечно-элементного исследования устойчивости и напряженно-деформированного состояния тонкостенных конст-

рукций при различных геометрических параметрах, размещении ребер и условиях нагружения;

- методики прогнозирования и обеспечения устойчивости пластин с ребрами в составе тонкостенных крановых конструкций;

- метод прогнозирования напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций с учетом неплоскостности элементов, вызванной сварочными деформациями.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что:

- обоснованы рекомендации по обеспечению устойчивости элементов тонкостенных конструкций путем рациональной расстановки ребер и определению их геометрических параметров;

- подтверждены локальные перегрузки угловых зон коробчатых балок, возникающие в результате неплоскостности поясов и стенок, и найдены интервальные оценки степени этой перегрузки для крановых конструкций различных типов;

- обоснованы нормы неплоскостности элементов коробчатых тонкостенных конструкций из условия ограничения перегрузки угловых зон.

Полученные в работе инженерные методики могут быть применены при проектировании металлических конструкций грузоподъемных машин, проведении экспертиз и обследованиях.

**Апробация работы.** Результаты данной работы были доложены на конференциях Недели науки СПбГПУ и 5-ой международной специализированной выставке подъемно–транспортного оборудования «КРАНЭКСПО-2010».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ (из них 2 работы в журналах Перечня ВАК).

**Внедрение результатов исследования.** Материалы диссертации были переданы в ЗАО «РАТТЕ» и ЗАО «ПО Технорос» и использованы специалистами этих организаций при экспертизе и проектировании металлических конструкций кранов.

**На защиту выносятся** следующие наиболее существенные научные результаты диссертационной работы:

1. Результаты конечно-элементного исследования устойчивости пластин в составе тонкостенных конструкций при различных геометрических параметрах и условиях нагружения.

2. Аналитическая методика вычисления коэффициентов упругого защемления, учитывающая влияние соседних элементов на критические напряжения пластины, являющейся элементом тонкостенной конструкции.

3. Результаты конечно-элементного исследования устойчивости пластин, подкрепленных ребрами, при различных геометрических параметрах, размещении ребер и условиях нагружения.

4. Методики прогнозирования и обеспечения устойчивости пластин с ребрами в составе тонкостенных крановых конструкций, подвергаемых различным видам нагружения.

5. Рекомендации по рациональному проектированию оребрения и оценке эффективных геометрических параметров ребер.

6. Метод прогнозирования напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций с учетом неплоскостности элементов, вызванной сварочными деформациями, и рекомендации по ограничению максимального значения относительной стрелки прогиба пластин.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, списка литературы в 56 наименований и четырех приложений. Объем диссертации составил 127 страниц основного текста, в том числе, 61 рисунок, 24 таблицы.

## **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность и структура работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены сведения о структуре диссертации и программе работ.

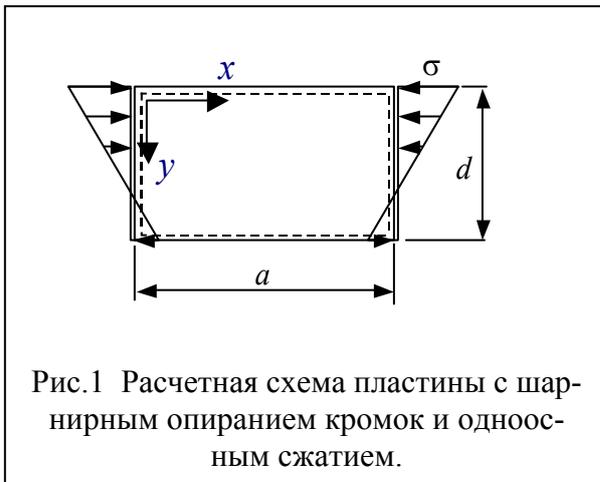
**В главе 1** рассмотрено явление местной потери устойчивости и пред-

ставлен обзор литературы по этой проблеме. Отмечена большая история развития этой проблемы, которой занимались многие российские и зарубежные ученые, в том числе С.П.Тимошенко, Ф.Блейх, Б.М.Броуде, М.М. Гохберг. Представлен обзор и анализ методов прогнозирования и обеспечения местной устойчивости пластин, рекомендации по установке и определению параметров ребер, которые представлены в научной и нормативной литературе.

В данной работе в качестве базовой формулы для вычисления критических напряжений  $\sigma_c$  для прямоугольной пластины толщиной  $t$ , шириной  $d$ , закрепленной по контуру (рис. 1), в условиях одноосного напряженного состояния используется известное выражение

$$\sigma_{cp} = k_s K_{s0} \cdot \left( \frac{t}{d} \right)^2,$$

где  $k_s = [1 + 0,42\gamma + 0,52\gamma^3] \zeta_s$  – коэффициент устойчивости, отражающий



влияние размеров пластины и условий нагружения;  $\gamma = 1 - \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  – параметр нагружения пластины;  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  – наибольшее сжимающее напряжение на кромке  $y = 0$  и напряжение на кромке  $y = d$ . В этой формуле  $\zeta_s \geq 1$  – коэффициент влияния упругого заземления кромок пластины, ме-

тодики определения которого в зависимости от конструкции и параметров балки в литературе нет.

Рассмотрена специфика проблемы местной устойчивости для крановых конструкций, которые являются сварными тонкостенными листовыми конструкциями, подвергающимися переменному нагружению от различных комбинаций нагрузок. Это приводит к тому, что характер распределения напряжений в элементах конструкции меняется в процессе работы машины и размещение ребер, которое вполне эффективно при одной комбинации может

оказаться мало эффективным при другой. В связи с этим сформулирована задача разработки методики обоснования рационального оребрения пластин. Обоснована также необходимость анализа напряженно-деформированного состояния балок с неплоскими элементами.

На основании литературного обзора и анализа особенностей крановых конструкций сформулированы основные задачи и программа исследования.

**Глава 2** посвящена анализу и разработке методики расчета на устойчивость пластин находящихся в составе конструкции, т.е. связанных с соседни-

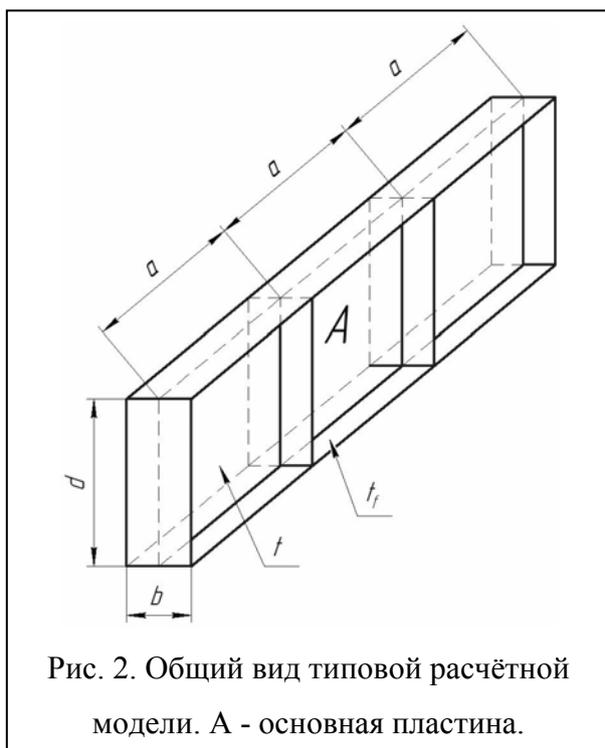


Рис. 2. Общий вид типовой расчётной модели. А - основная пластина.

ми элементами: поясами, диафрагмами, ребрами или продолжением пластины в соседних панелях. Эти упругие связи, учитываемые коэффициентом  $\zeta_s$ , способны существенно повысить устойчивость пластины, если соседние элементы имеют больший запас устойчивости, чем рассчитываемая пластина.

Коэффициент  $\zeta_s$  функционально зависит от относительных жесткостей присоединенных элементов, то есть

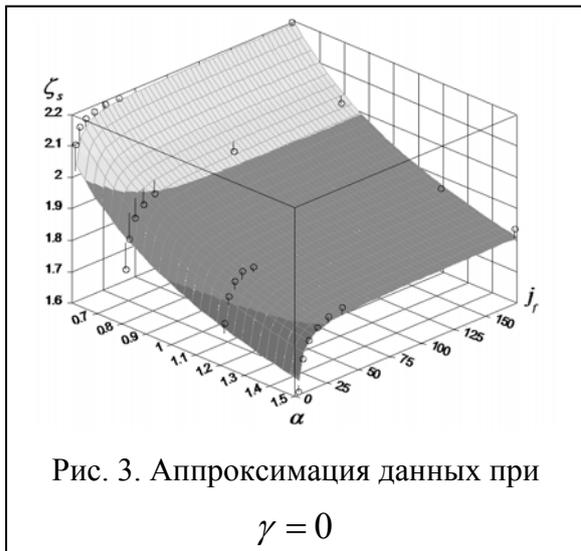
$$\zeta_{s,\tau} = f(j_f, j_{pl}, j_r \dots),$$

где  $j_f = J_f / J_{pl}$ ;  $j_{pr} = J_{pr} / J_{pl}$ ;  $j_r = J_r / J_{pl}$ ;  $J_f = (b_f \cdot t_f^3) / 3$ ;  $J_{pl} = (d \cdot t^3) / 12$ ,  $J_r$  – условные моменты инерции, соответственно, пояса, пластины, ребра, характеризующие изгибную жесткость соответствующего элемента.

Для определения параметров и вида искомой функции  $\zeta_s$  была проведена серия численных экспериментов МКЭ на моделях двутавровых и коробчатых балок с параметрами, характерными для крановых конструкций. Анализ результатов этих расчетов и обработка полученного массива с помощью программного пакета «TableCurve3D» позволили установить вид функции, которая описывает зависимость коэффициента  $\zeta_s$  от указанных аргументов с по-

грешностью  $\pm 10\%$  (рис. 3). Так, для стенки балки при одноосном поле напряжений  $\zeta_s = \zeta_{s\sigma}$  и при чистом сдвиге  $\zeta_s = \zeta_{s\tau}$  получились следующие зависимости:

$$\zeta_{s\sigma} = 1,5 + \frac{3,8 - \gamma}{10\alpha} - \frac{6 + 0,5\gamma}{10j_f} \quad \text{и} \quad \zeta_{s\tau} = \begin{cases} 0,035 \cdot j_f + 1 & \text{при } 0,01 \leq j_f \leq 12 \\ 1,42 & \text{при } j_f > 12 \end{cases}$$



Как показало сравнение, данная методика дает лучшие результаты, чем рекомендации, имеющиеся в литературе.

**Глава 3** посвящена исследованию и разработке методики обеспечения устойчивости пластин с ребрами. Ребра весьма эффективный прием повышения местной устойчивости пластин. Постановка одного ребра позволяет повысить

устойчивость пластины в 4÷5 раз и более, в зависимости от вида нагружения пластины, что по эффективности эквивалентно увеличению толщины пластины не менее чем в два раза, но значительно менее металлоемко. Ребра выполняют из прокатного профиля, из полосы или же гнутых профилей.

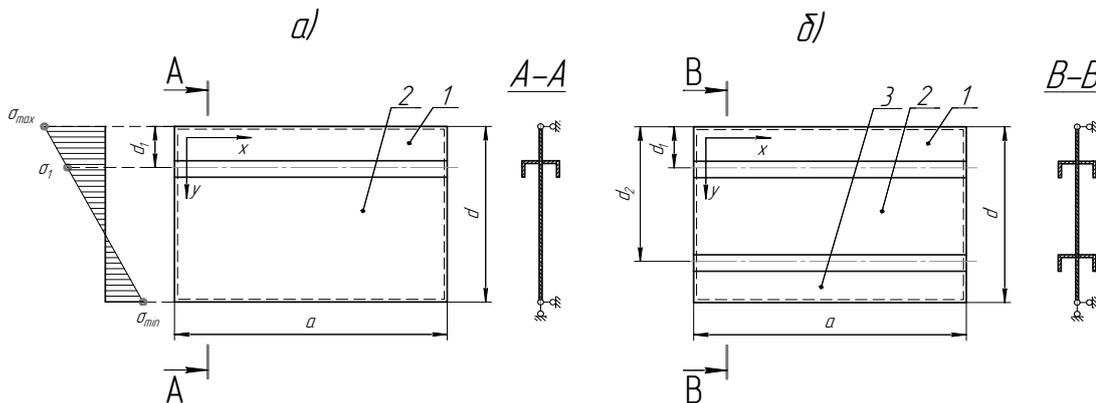


Рис. 4. Схема пластины с ребрами. 1, 2 и 3 – панели.

При преобладающем влиянии нормальных напряжений в пластине ребро, или ребра, устанавливают вдоль направления нормальных напряжений (рис. 4.).

Целью данной части работы являлась методика, позволяющая оценить устойчивость пластины с несколькими ребрами при различных вариантах распределения напряжений.

Для исследования устойчивости элемента тонкостенной конструкции с ребрами выполнен конечно-элементный анализ серии моделей прямоугольных пластин, шарнирно закрепленных по контуру, с продольными ребрами. Модели отличались габаритными размерами пластин, размещением и сечением ребер, характером нагружения. В общей сложности было выполнено более 1000 расчетов.

Результаты конечно-элементного анализа показали, что в зависимости от геометрических параметров модели и условий нагружения потеря устойчивости происходила по одному из двух типов: в виде потери устойчивости пластины вместе с ребром или в виде искривления отдельных панелей при сохранении устойчивости ребра. Соответственно, зависимость  $\sigma_c = f(j_r)$ , где  $j_r = J_r / J_{pl}$ , состоит из двух участков, восходящей ветви в области  $j_r \leq j_{ro}$  и практически горизонтального графика в области  $j_r > j_{ro}$ .

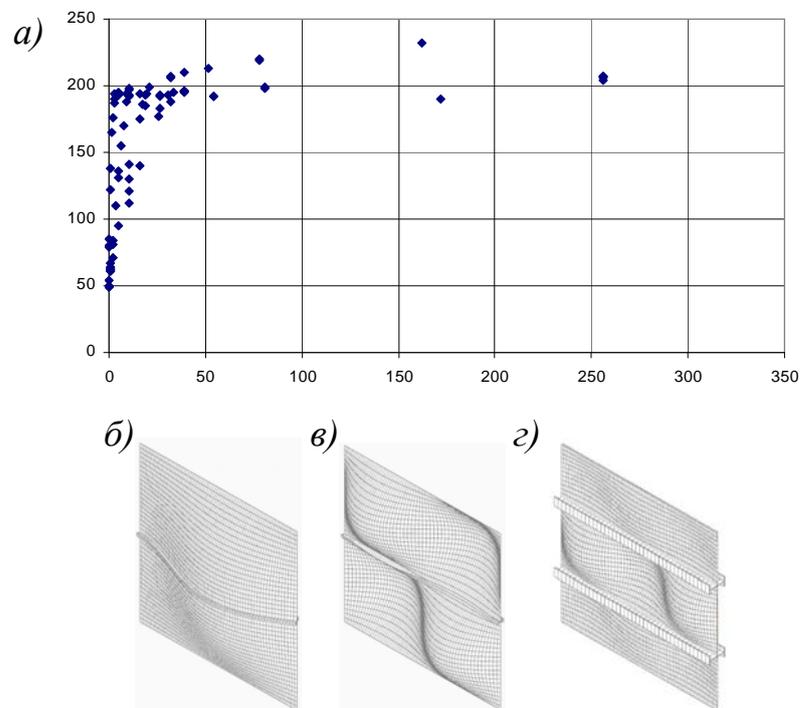


Рис.5. Зависимость критических напряжений  $\sigma_c = f(j_r)$  (a) и характерные формы потери устойчивости пластин с ребрами (б, в, з)

Значение параметра  $J_{ro}$ , которому соответствует изменение характера потери устойчивости пластины с ребром, назван пороговым относительным моментом инерции ребра. Он зависит от расстановки и параметров сечения ребер, характера нагружения и размеров пластины.

На основании анализа результатов была сформирована система условий устойчивости пластины с ребрами, которая включает условия двух типов:

– условие устойчивости ребра вместе с пластиной

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_{cpr}] = \sigma_{cpr} / n;$$

– условия устойчивости каждой панели в отдельности

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_{ci}] = \sigma_{ci} / n.$$

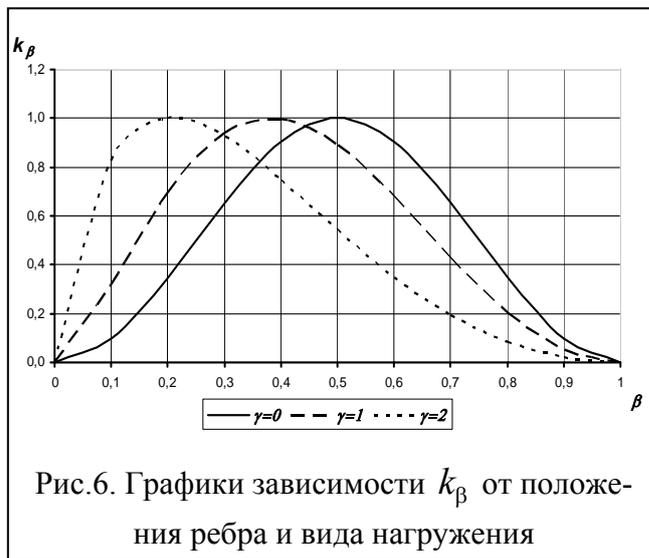
где  $\sigma_{cpr}$  – критическое напряжение для системы «пластина+ребро»;  $\sigma_{ci}$  – критическое напряжение, равное максимальному сжимающему напряжению на кромке  $y = 0$ , найденному из условия устойчивости  $i$ -той панели пластины при заданной  $\gamma$ .

Общая структура выражения для вычисления критического напряжения  $\sigma_{cpr}$  при совместной потере устойчивости пластины вместе с ребром построена на основе стержневой аналогии. Для учета условий закрепления пластины, характера распределения напряжений по сечению, количества и расположения ребер на пластине введены эмпирические коэффициенты, которые получены из результатов конечно-элементного анализа. Результирующее выражение имеет вид

$$\sigma_{cpr} = \sigma_{cp} + \frac{\pi^2 EJ_r k_\beta}{a^2 k_\gamma dt}.$$

Здесь  $J_r$  – момент инерции ребра;  $dt$  – площадь сечения пластины;  $k_\beta$  – коэффициент влияния ребра;  $k_\gamma$  – коэффициент влияния вида нагружения.

Коэффициент влияния ребра  $k_\beta$  учитывает степень участия ребра в обеспечении устойчивости системы и зависит от характера распределения напряжений и расположения ребра (рис. 6):



$$k_\beta = \sin^2 \left[ \pi \beta^{1-0,28\gamma} \right].$$

Если же на пластине установлено несколько ребер жесткости, то коэффициент  $k_\beta$  вычисляется как сумма  $k_\beta = \sum_m \sin^2 \left( \pi \beta_m^{1-0,28\gamma} \right)$ .

Коэффициент влияния нагружения  $k_\gamma$  учитывает условия нагружения первого, то есть наиболее

нагруженного, ребра:

$$k_\gamma = 1 - \gamma \beta_0 = 1 - 0,5\gamma + 0,15\gamma^2.$$

Таким образом, выражение для расчета критических напряжений для пластины, теряющей устойчивость вместе с ребром, примет вид:

$$\sigma_{cpr} = \sigma_{cp} + \frac{1,15\pi^2 EJ_r}{(1 - 0,5\gamma + 0,15\gamma^2) a^2 d t} \sum_m \sin^2 \left( \pi \beta_m^{1-0,28\gamma} \right),$$

где  $m$  – это количество ребер.

Критические напряжения для панелей, на которые ребра делят пластину, обусловлены размерами панелей и уровнем максимальных сжимающих напряжений, которые действуют в каждой из них, и вычисляются как

$$\sigma'_{ci} = k_{si} K_{s0} \left( \frac{t}{d_i - d_{i-1}} \right)^2 \leq \sigma_T, \left( d_{i=0} = 0, d_{i=1,\dots} \neq 0 \right).$$

Здесь  $k_{si}$  – коэффициент устойчивости  $i$ -той панели, отражающий влияние условий закрепления кромок и распределения напряжений по их ширине.

С учетом вышеприведенных выводов система условий устойчивости пластины с ребрами принимает следующий вид:

$$\sigma_c = \min \begin{cases} \sigma_{cpr} = \sigma_{cp} + \frac{1,15\pi^2 EJ_r}{(1-0,5\gamma+0,15\gamma^2)a^2 dt} \sum_m \sin^2(\pi\beta_m^{1-0,28\gamma}); \\ \sigma_{c1} = \zeta_{S1} (1+0,42\gamma_1+0,52\gamma_1^3) K_{S0} \left(\frac{t}{d_1}\right)^2; \\ \sigma_{ci} = \zeta_{S2} \frac{1}{1-\gamma\beta_i} (1+0,42\gamma_i+0,52\gamma_i^3) K_{S0} \left(\frac{t}{d_i-d_{i-1}}\right)^2, \quad i \geq 2. \end{cases} .$$

Из этих условий можно найти такое значение момента инерции ребра, при котором  $\sigma_{cpr} \geq \sigma_{ci}$ . Для инженерной практики полезно оценить интервал рациональных значений относительного момента инерции ребра  $j_r$ . Так, например, верхнюю границу рационального интервала получим из условия  $\sigma_{cpr} = \sigma_T$  ( $\sigma_T$  – предела текучести материала конструкции), что дает

$$j_r \leq 12 (1-0,5\gamma+0,15\gamma^2) a^2 \frac{\sigma_T - (1+0,42\gamma+0,52\gamma^3) K_{S0} \left(\frac{t}{d}\right)^2}{1,15t^2\pi^2 E \sum_m \sin^2(\pi\beta_m^{1-0,28\gamma})}.$$

Нижняя граница может быть установлена из конструктивно-технологических соображений на основании норм СНиП II-23-81\*, как  $j_r \geq 18$ .

Оценка точности прогнозирования критических напряжений по предлагаемой методике выполнена путем сравнения расчетных значений с результатами конечно-элементного анализа. Для пластин с одним ребром относительная погрешность составляет  $-40\% \leq \Delta \leq +10\%$ , для пластин с двумя и более ребрами получается  $-32\% \leq \Delta \leq +3\%$ . Как видно, методика в основном дает оценку критических напряжений с погрешностью в запас устойчивости, что вполне оправдано с учетом влияния всех сделанных ранее допущений.

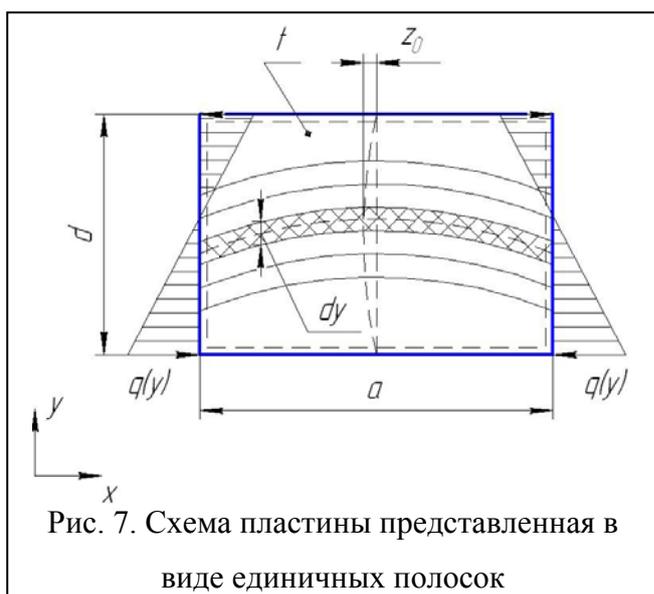
На основе вышеприведенной методики предложен алгоритм поиска рациональной системы оребрения, обеспечивающей устойчивость пластины при нескольких вариантах нагружения (комбинациях нагрузок).

**Глава 4** посвящена исследованию влияния неплоскостности элементов на напряженно-деформированное состояние конструкции. Неплоскостность

элементов, образующих листовую конструкцию, возникает в результате тепловых деформаций сварных швов, неточности сборки и исходной неплоскости проката. В нормативных материалах для конструкций грузоподъемных машин установлены допустимые значения относительной стрелки прогиба пластин, которые составляют  $[z_0/d] = 0,005$  или же  $[z_0/t] = 5$ . Однако эти критерии не имеют научного обоснования и в основном связаны с конструктивно-технологическими требованиями и обеспечением товарного вида изделия.

Неплоские пластины имеют меньшую продольную жесткость, чем плоские, поэтому при нагружении они воспринимают меньшие напряжения, чем предусмотрено проектным расчетом. Это приводит к перегрузке более жестких элементов, которыми являются угловые зоны коробчатых балок, в которых стенки соединяются с поясами. В этих же зонах возникают наибольшие нормальные напряжения от сложного изгиба и располагаются сварочные концентраторы от присоединения диафрагм, кронштейнов и пр. Таким образом, повышение напряжений в этих зонах снижает коэффициент запаса прочности конструкции и повышает риск возникновения локальных пластических деформаций, хрупких или усталостных разрушений.

Первоначальные исследования по определению наиболее неблагоприятной формы искривления пластины показали, что самой опасной формой



искривления пластины является первая форма потери устойчивости. Для построение методики оценки перераспределения напряжений в сечении тонкостенной балки с неплоскими элементами были сделаны следующие основные допущения:

- при нагружении балки с неплоскими элементами спра-

ведлива гипотеза плоских сечений;

- влиянием касательных напряжений можно пренебречь;
- форма начального искривления сохраняется в процессе нагружения

и описывается уравнением

$$z(x, y) = z_0 \sin\left(\pi \frac{a}{x}\right) \sin\left(\pi \frac{d}{y}\right).$$

С использованием стержневой аналогии пластина описывается как совокупность элементарных балок-полосок, нагруженных продольными силами. Условия их сопряжения учитываются с помощью эмпирических коэффициентов, найденных в результате обработки серии конечно-элементных расчетов.

В результате получено выражение для расчета коэффициентов погонной податливости пластины

$$\chi(y) = 1 + \frac{0,45(2 + \bar{\varphi})}{(1 - \bar{\varphi})^2} \cdot \left(\frac{z_0(y)}{t}\right)^2 (1,05 - \bar{\varphi})^2 \frac{t}{z_0}.$$

Здесь  $\bar{\varphi} = \sigma(y)/\sigma_c$  – отношение действующих напряжений к критическим напряжениям пластины при данном виде нагружения, но для полосок, расположенных в области сжатия, этой величине присваивается знак «плюс», а в зоне растяжения – «минус»;  $z_0$  – стрелка прогиба пластины.

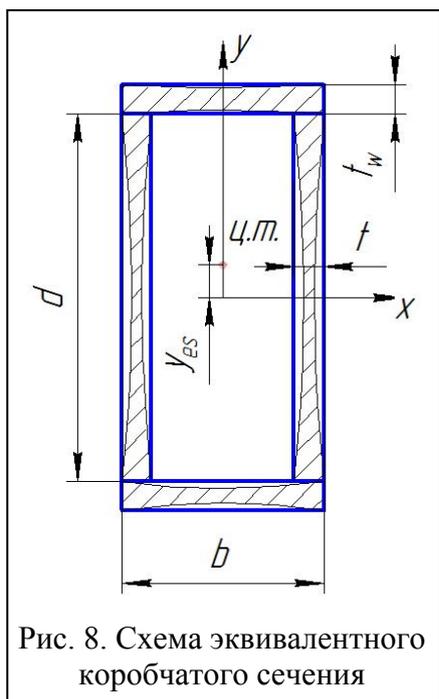


Рис. 8. Схема эквивалентного коробчатого сечения

Для оценки характера и степени перераспределения напряжений в коробчатой балке с неплоскими элементами ее пояса и стенки заменяются плоскими пластинами переменной эквивалентной толщины  $t_e(y) = t/\chi(y)$ . Далее рассчитываются характеристики нового эквивалентного сечения балки как

$$A_{es} = \sum_i A_e^i; \quad y_{es} = \frac{\sum_i A_e^i y^i}{\sum_i A_e^i}$$

$$J_{es} = \sum_i J_e^i + \sum_i A_e^i (y_{es} - y^i)^2, \quad \text{где } i = 1 \dots 4 \text{ – количество}$$

ство пластин в составе сечения,  $A_e^i, J_e^i, y^i$  – площадь, момент инерции и расстояние до центра тяжести для каждой пластины.

Значения напряжений в  $k$ -той угловой точке балки вычисляются как

$$\sigma_k(y) = \frac{F}{A_{es}} + \frac{M(y_{es} - y)}{J_{es}}.$$

При этом коэффициент перегрузки угловых зон  $\varphi_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{nom}}$ , где  $\sigma_{nom}$  – это значение напряжений в той же  $k$ -той угловой точке сечения, найденное по проектным размерам балки без учета искривления элементов.

Конечно-элементные расчеты, выполненные для ряда моделей, показали, что погрешность аналитических оценок при  $z_0/t \leq 1$  укладывается в интервал  $\pm 12\%$ . При увеличении значения  $z_0/t$ , погрешность предлагаемой методики увеличивается до  $+24\%$ . В связи с этим область применимости предлагаемой методики ограничена интервалом  $z_0/t \leq 1$ .

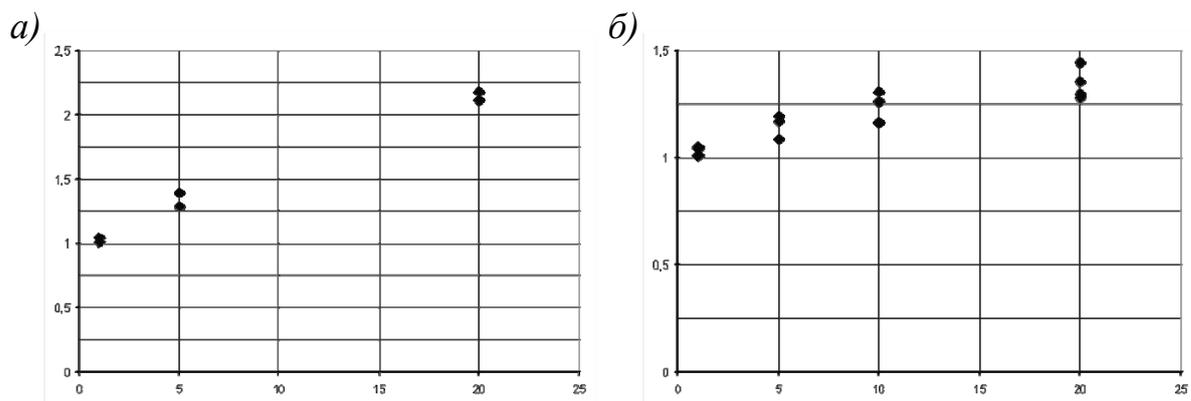


Рис. 8. Графики изменения величины перегрузки при сжатии балки (а) и изгибе (б)

Результаты численных и аналитических исследований показали, что коэффициент перегрузки  $\varphi_k$  при сжатии балки с  $z_0/t = 1$  может достигать 1,5. Меньшие перегрузки появляются при изгибе балки. Но и в этом случае при стрелке прогиба  $z_0/t = 5$ , как это допускает РД 10-112-6-03, можно также получить перегрузку углов сечения более чем на 50% по сравнению с проектным уровнем напряжений.

Если для оценки допустимого уровня неплоскостности пластин допустить, что перегрузка угловых зон, связанная с этим фактором, не должна превышать 20%, то есть половины резерва, задаваемого коэффициентом запаса прочности  $n = 1,4$ , то допустимая кривизна листов в балке, подвергаемой в основном сжатию (как, например, балочные стрелы), не должна превышать  $z_0/t = 0,3$ , а для изогнутых балок  $z_0/t = 1,0$ .

**Глава 5** посвящена экспериментальному исследованию напряженно-деформированного состояния сварной стальной модели балки коробчатого сечения, которое было проведено для оценки достоверности методик предложенных в главах 2 и 4.

Модель представляет собой сварную балку коробчатого сечения длиной 2000 мм, выполненную из стали Ст3сп толщиной 4 мм. Нагружение осуществлялось через нагрузочный кронштейн при помощи винтовой стяжки.

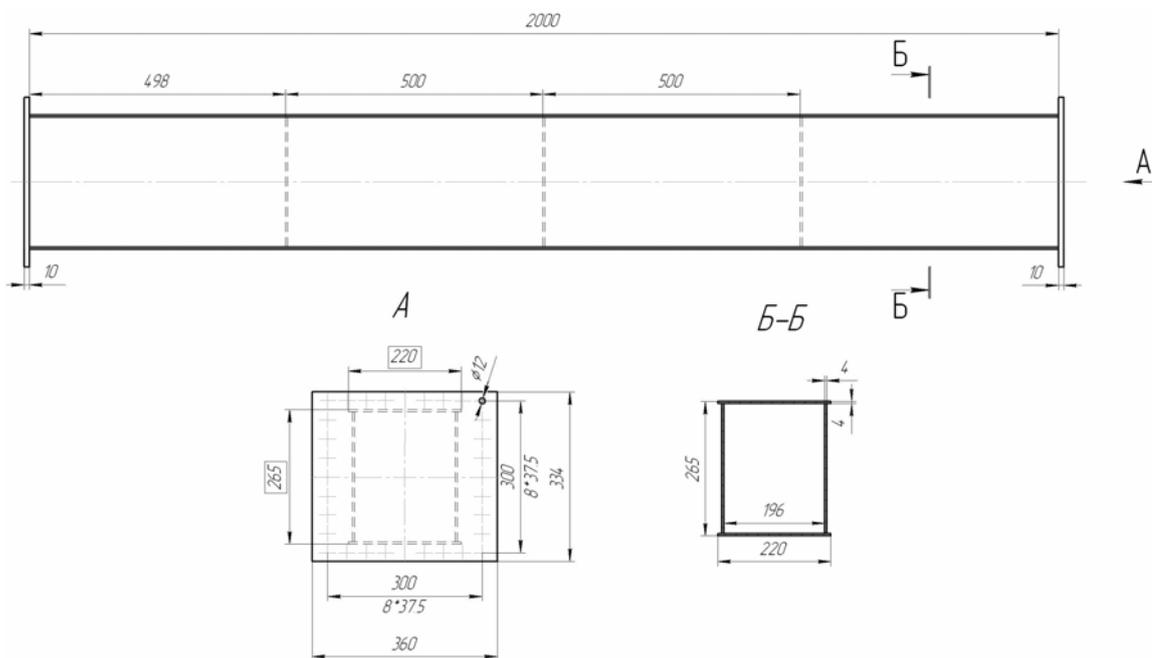


Рис.9. Эскиз балки

В ходе эксперимента были получены распределения напряжений по длине балки в угловых зонах как в сжатой, так и в растянутой области, а также локальные деформации поясных листов, и общий изгиб балки.

Анализ профилограмм, первоначальной и полученной при максимальной нагрузке, подтвердил, что пластины искривляется в соответствии со своими первыми формами потери устойчивости. Результаты эксперимента подтвердили расчетные оценки коэффициента перегрузки угловых зон, выполненные по предлагаемой методике. Погрешность в основном составила  $\pm 12\%$ ).

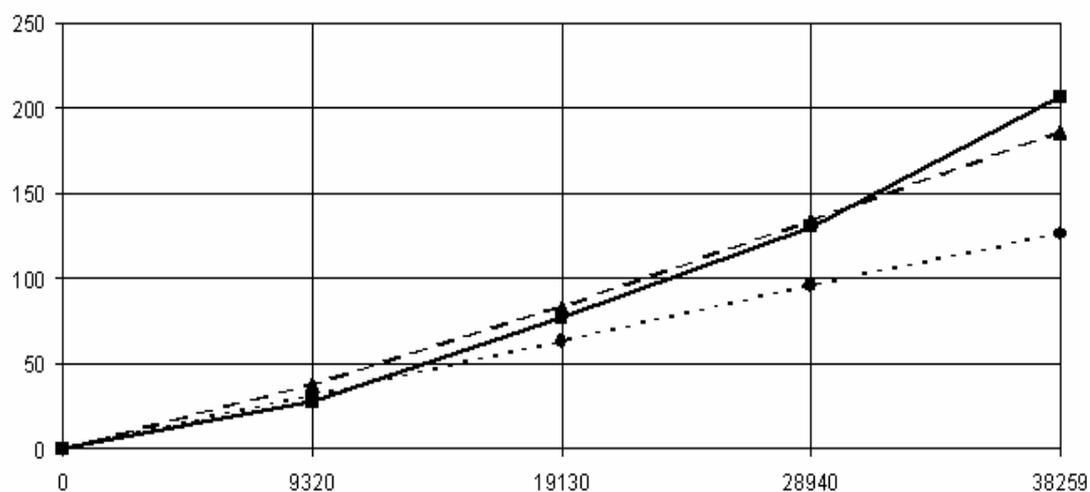


Рис.10. Зависимость напряжений сжатия в угловой зоне балки от нагрузки  
(■ – экспериментальные значения, ▲ – значения методики, ● – номинальные значения)

## Основные результаты и выводы

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Серия расчетов конечно-элементных моделей тонкостенных конструкций позволила установить влияние связи отдельных пластин с соседними элементами на значение их критических напряжений при различных геометрических параметрах конструкций и условиях нагружения.

2. Получены аналитические аппроксимирующие формулы для вычисления коэффициентов защемления пластины в зависимости от конфигурации и геометрических параметров конструкции и условий нагружения, которые позволяют учитывать влияние упругого защемления кромок пластины на их местную устойчивость с погрешностью не более  $\pm 10\%$ .

3. В результате проведения серии численных экспериментов, выполненных методом конечных элементов, получены данные о характере процесса потери устойчивости пластин с ребрами, определены основные характерные формы потери устойчивости и сформулирован перечень условий устойчивости, которые должны учитываться при проектировании.

4. Разработана инженерная аналитическая методика расчета пластин с ребрами на местную устойчивость, учитывающая геометрические параметры конструкции и орebrения, а также характер распределения напряжений в пластине.

5. На основании указанной методики предложен алгоритм обеспечения местной устойчивости тонкостенных крановых конструкций с учетом различных комбинаций нагружения, даны рекомендации по рациональному проектированию орebrения и интервальной оценке геометрических параметров ребер.

6. В результате проведения конечно-элементных исследований, а также испытания стальной сварной модели установлено, что неплоскостность элементов сварных конструкций, возникающая в результате сварочных поводов, приводит к перераспределению напряжений в их сечениях. При

этом напряжения в узловых зонах, в которых расположены сварные соединения поясов со стенками, существенно превосходят номинальные, вычисленные по технической теории изгиба балок.

7. Разработана инженерная аналитическая методика расчета максимальных действующих напряжений в угловых зонах коробчатых балок с неплоскими элементами, учитывающая геометрические параметры, параметры неплоскостности элементов и характер нагружения.

8. Анализ напряженно-деформированного состояния коробчатых балок, используемых для стрел и пролетных строений грузоподъемных машин, показал, что в результате неплоскостности их элементов с параметрами, не превышающими допускаемых по нормам для крановых конструкций, угловые зоны получают перегрузку достигающую  $50 \div 60\%$ , в зависимости от параметров нагружения.

9. На основании анализа влияния неплоскостности на перераспределение напряжений в сечении балки и ограничения перегрузки углов уровнем  $+20\%$  даны рекомендации по ограничению максимального значения относительной стрелки прогиба пластин в составе конструкций в зависимости характера нагружения.

## **Публикации по теме диссертации**

### *Статьи в журналах перечня ВАК*

1. Грачев. А.А., Соколов С.А. Устойчивость пластин с ребрами. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 4(110)/2010. СПб Изд. Политехнического университета. 2010 с. 200–204.
2. Грачев. А.А., Соколов С.А. Влияние неплоских элементов на работоспособность тонкостенных металлических конструкций грузоподъемных машин. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2-2(147)/2012. СПб Изд. Политехнического университета. 2012 с. 78–81.

### *Статьи в научных изданиях*

3. Грачев. А.А., Соколов С.А. Исследование местной устойчивости пластин. Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. СПб Изд. Политехнического университета. 2005. с. 67–68.
4. Грачев. А.А., Соколов С.А. Исследование местной устойчивости пластин. Труды СПбГПУ №494. СПб Изд. Политехнического университета. 2005. с.5–8
5. Грачев. А.А., Соколов С.А. Исследование концентрации напряжений в угловых сопряжениях балок. Труды СПбГПУ №494. СПб Изд. Политехнического университета. 2005. с.14-20.
6. Грачев. А.А., Соколов С.А. Исследование местной устойчивости пластин. Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. СПб Изд. Политехнического университета. 2006. с. 64–66.
7. Грачев. А.А., Соколов С.А. Исследование местной устойчивости пластин. Труды международной научно-технической конференции. СПб Изд. Политехнического университета. 2006. с. 66–69.
8. Грачев. А.А., Соколов С.А. Исследование влияния криволинейности пластин на их местную устойчивость и общее напряженно-деформированное состояние. Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. СПб Изд. Политехнического университета. 2008. с. 140–142.