

Наумов Александр Владимирович

**УСТОЙЧИВОСТЬ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТЕНОК КРАНОВЫХ
КОРОБЧАТЫХ БАЛОК**

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Манжула Константин Павлович**
Доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Панасенко Николай Никитович**
Доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», институт морских технологий, энергетики и транспорта, г. Астрахань

Фрумен Александр Исаакович
Кандидат технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», кафедра строительной механики корабля, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «28» апреля 2022 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.05.05.04 при ФГАОУ ВО «СПбПУ» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая, ул., д. 29, главный учебный корпус, ауд.118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-candidate-of-sciences/naumov_aleksandr_vladimirovich/ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, директор ВШТ



Грачев Алексей Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Значительная часть несущих металлоконструкций современных машин транспортного комплекса имеет балочную структуру. Наиболее распространены в машиностроительных конструкциях коробчатые балки, так как обладают повышенной жесткостью в горизонтальной плоскости и могут изготавливаться сваркой требуемой формы из листового проката. При работе на изгиб, сжатие или сжатие с изгибом элементы балок, помимо удовлетворения условиям прочности и жесткости, должны обеспечивать местную устойчивость. Потеря местной устойчивости этих элементов приводит к потере локальной или общей несущей способности, а также к аварийным ситуациям. Для ее обеспечения в балках увеличивают толщины элементов, устанавливают продольные и поперечные ребра, диафрагмы, которые увеличивают массу конструкции. Одним из целесообразных решений вышеуказанной проблемы явилось использование в 80-е годы XX столетия гофробалок (SIN-балок) – балок с гофрированными стенками, изготавливаемыми прокатом. Такие стенки особенно эффективны в двутавровых балках, а также в качестве стенок железнодорожных вагонов, транспортных контейнеров, мостов. Попытки использования гофрированных стенок в коробчатых крановых балках распространения не получили, из-за заранее заданного расположения гофра в местах стенок, определяемого при прокатке, что, как правило, не совпадает с конструктивным его расположением по соображениям местной устойчивости.

Одним из решений проблемы увеличения местной устойчивости стенок коробчатых балок является придание им кривизны, так как известно, что оболочки, купольные элементы обладают большей местной устойчивостью, по сравнению с плоскими листами. В этом случае снижается число устанавливаемых ребер и масса конструкции. Однако, как показал анализ литературы, имеются патенты с предложениями использования криволинейных стенок в балках, но не обнаружены методы расчета на местную устойчивость таких стенок, а, следовательно, отсутствует и практика их применения.

Целью диссертации является повышение несущей способности металлоконструкций подъемно-транспортных, транспортных и строительных машин, строительных и мостовых конструкций по критерию обеспечения местной устойчивости, путем использования балочных элементов с криволинейными стенками, снижение их металлоемкости за счет уменьшения числа диафрагм, продольных и поперечных ребер жесткости, а также развитие методов расчета конструкций с криволинейными элементами.

Для осуществления поставленной цели сформулированы следующие **основные задачи:**

1. разработать методику конечно-элементного моделирования балки с криволинейными стенками и проведения численного исследования местной устойчивости, установить границы максимально возможной кривизны стенки;
2. выполнить численное исследование местной устойчивости криволинейной стенки при вариации геометрических параметров балки для основных расчетных схем нагружения: сжатие, изгиб, сжатие с изгибом, для случаев действия нормальных и касательных напряжений;
3. получить расчетные зависимости для определения критических напряжений местной устойчивости криволинейных стенок в коробчатых балках с учетом влияния их геометрических размеров и условий нагружения;
4. провести экспериментальное исследование коробчатых балок с плоскими и радиусными стенками, определить критические напряжения потери местной устойчивости и оценить погрешность расчетных зависимостей относительно результатов экспериментального исследования;
5. оптимизировать криволинейную форму стенки по критериям устойчивости и минимальной массы;
6. разработать рекомендации по использованию криволинейных стенок в коробчатых балках с целью снижения их массы, числа устанавливаемых продольных и поперечных ребер жесткости.

Научная новизна заключается в обосновании повышенных в разы характеристик местной устойчивости криволинейных стенок в коробчатых балках по сравнению с плоскими стенками, в разработке методики расчета их местной устойчивости, в полученных уравнениях для оценки критических напряжений устойчивости.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. обосновано использование криволинейных стенок в составе коробчатых балок для увеличения местной устойчивости и снижения массы итоговой конструкции;
2. получены инженерные расчетные зависимости определения местной устойчивости криволинейных стенок при различных видах нагружения, применимые в проектировании металлических конструкций грузоподъемных машин, в проведении экспертиз и обследований;
3. предложены рекомендации по применению полукриволинейных стенок в балках при различных нагружениях для снижения числа вспомогательных элементов массы конструкции.

Методологической и теоретической основой исследования являются работы отечественных и зарубежных ученых в области устойчивости элементов конструкций, стандарты по расчету и обеспечению работоспособности элементов металлоконструкций. Основной исследовательский аппарат включил в себя численный и физический эксперименты, а также аналитические методы исследования. В исследовательской работе были использованы программные комплексы: конечно-элементного моделирования и расчета ANSYS Workbench и SOLIDWORKS; обработки и аппроксимации массивов данных, построения расчетных зависимостей MathCad и Excel; считывания и записи массивов экспериментальных данных датчиков LGraph, а также аппаратура и методы для проведения тензометрирования.

Степень достоверности научных положений и выводов обоснована использованием основополагающих принципов и законов механики

деформируемого твердого тела, использованием апробированных программных САД, САЕ комплексов, средств вычислительной математики, применением точной контрольно-измерительной аппаратуры, согласованностью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Апробация результатов. Результаты исследования были представлены на международных научных конференциях «Современное машиностроение: Наука и образование», Санкт-Петербург, 2016 и 2017 гг.; XXI Международной научно-технической конференции МИСИ – МГСУ, 2018 г.; «Неделя науки СПбПУ», 2016 и 2017 гг., «Наземные транспортно-технологические комплексы и средства», Тюмень, 2016 г.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 12 статей в научных журналах и в сборниках конференций, из них 1 в журнале из перечня ВАК, 3 статьи входят в международную базу цитирования Scopus и приравнены к перечню ВАК.

Внедрение результатов исследования

Результаты исследований внедрены в учебный процесс в СПбПУ, используются в дисциплине «Прочность и долговечность конструкций»

На защиту выносятся следующие наиболее существенные научные результаты диссертационной работы:

1. результаты численных и экспериментальных исследований, обосновывающие эффективность влияния кривизны на местную устойчивость стенок в составе коробчатых балок;
2. расчетные зависимости для определения критических нормальных и касательных напряжений местной устойчивости криволинейных и полукриволинейных стенок в коробчатых балках при различных видах нагружения и их сочетаний;
3. условия по назначению предельных радиусов кривизны стенок в коробчатых балках и рекомендации по влиянию геометрических параметров на критические напряжения устойчивости;

4. методика конечно-элементного моделирования и расчета местной устойчивости криволинейных стенок в составе пакета программ SOLIDWORKS, ANSYS Workbench, MathCad и Excel;
5. рекомендации по целесообразному применению, на основе критериев устойчивости и минимума массы, криволинейной и полукриволинейной формы стенки, продольных ребер и диафрагм в коробчатых балках.

Объем и структура диссертации: Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 187 страницы, включая 25 таблиц, 90 рисунков и схем. Список использованной литературы содержит 81 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы.

В главе 1 рассмотрено явление местной устойчивости пластин в балках, содержится обзор конструктивных решений повышения характеристик местной устойчивости. Проведен литературный обзор по методам расчета местной устойчивости.

Одним из критериев обеспечения работоспособности металлических конструкций балочного типа является обеспечение местной устойчивости их составляющих элементов. Этот критерий характеризует условие перехода элемента конструкции под действием эксплуатационных сжимающих нагрузок из исходного установившегося неустойчивого положения элемента в другое более устойчивое, но деформированное положение. Для конструкции в целом последствия такого перехода могут быть разными: от изменения внешнего вида конструкции, до потери работоспособности или ее разрушения. Данное явление встречается в грузоподъемных и строительных машинах, мостах, строительных конструкциях (рис. 1).

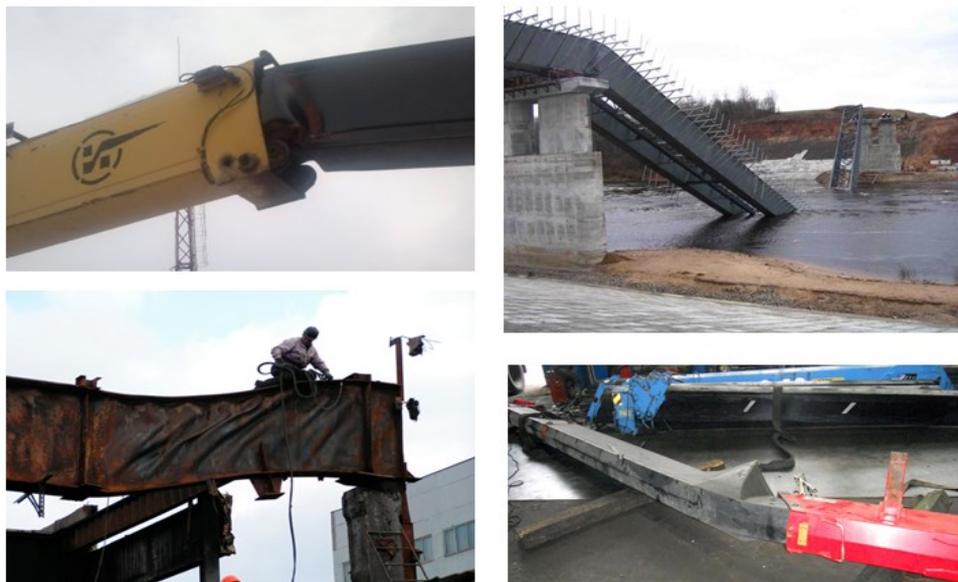


Рисунок 1- Примеры потери местной устойчивости элементов конструкций

Для повышения сопротивления местной устойчивости существуют различные возможные решения. Самым простым решением является увеличение толщин элементов балки, но при этом увеличивается металлоемкость и стоимость готового изделия. Как правило, наиболее распространенным способом повышения местной устойчивости элементов является введение в конструкцию подкрепляющих поперечных и продольных ребер, что тоже увеличивает массу изделия.

Одним из более рациональных способов повышения местной устойчивости конструкции является изменение геометрии элементов. В данном случае уже на стадии проектирования закладывается форма элементов, которая повышает критические напряжения местной устойчивости. Примером широко используемых конструкций с криволинейными стенками являются гофробалки, получившие распространение в строительных конструкциях, в стенках грузовых вагонов (рис. 2, а). Применение стенок с прокатным гофром в крановых балках рассматривалось в работах Кульковой Н.Н., однако практического применения не нашло по причине заранее задаваемого положения гофра в сжатой зоне стенки. Патентный поиск свидетельствует о целесообразности изменения геометрии

стенок для повышения местной устойчивости, особенно в балках работающих на изгиб (рис. 2, б).

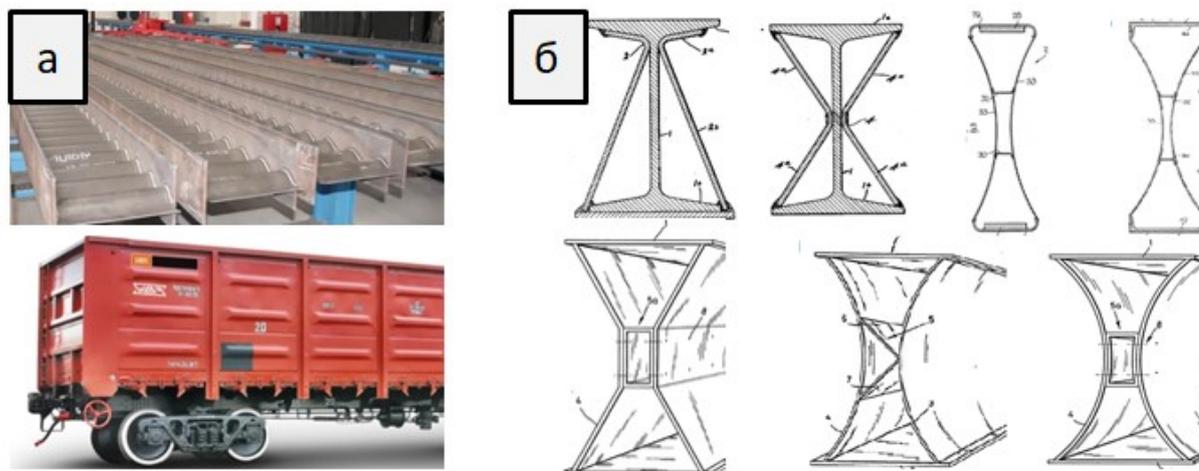


Рисунок 2- Способы повышения местной устойчивости: а) гофробалки; б) существующие патенты

В известных отечественных методах расчета местной устойчивости крановых металлоконструкций (Б.М. Броуде, М.М. Гохберг, С.А. Соколов, А.В. Некрасова, А.А. Грачев и др.) и зарубежных, а также в ГОСТ 33169-2014, гармонизированный с ISO 20332:2016, рассматриваются только плоские элементы. Аналогичные методики представлены в СНиП-II-23-81, BS EN 13001-3-1:2012, DIN-18800-3. В стандарте LLOYD-GL-IV-6-4 рассматриваются расчетные случаи устойчивости криволинейной пластины при торцевом сжатии и сдвиге. Однако в расчетной схеме не учитывается высота пластины, так как рассмотрен только один вариант геометрии (сечение криволинейной пластины является участком окружности, образующий сектор в 90°).

Согласно замечаниям стандартов ISO 20332:2016 и ГОСТ 33169-2014 подтверждение упругой устойчивости сложных тонкостенных конструкций целесообразно производить методом конечных элементов.

Результатами данной главы является подтверждение актуальности исследования местной устойчивости пластин с целью увеличения данной характеристики путем изменения формы самой пластины. Анализ научной литературы, действующих отечественных и зарубежных стандартов показал, что

методов расчета местной устойчивости криволинейных пластин в балках нет. Исключением является стандарт LLOYD, имеющий ограниченное применение.

Глава 2 посвящена разработке методики численного исследования местной устойчивости балок с криволинейными стенками (рис. 3), планированию численного эксперимента, разработке граничных условий.

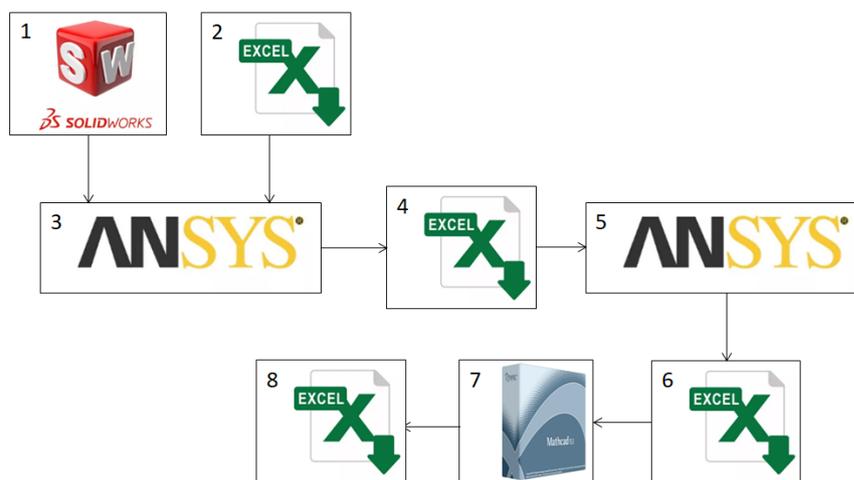


Рисунок 3- Методика проведения численного исследования

На *первом* этапе определялся массив комбинаций геометрических параметров на основе планирования многофакторного эксперимента

$$N = n^k,$$

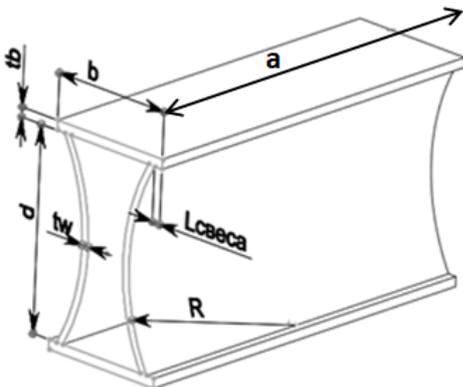
где N – количество расчетных моделей, k – количество варьируемых геометрических параметров, показанных в табл. 1; n – количество вариантов значений геометрических параметров, характерных для балок грузоподъемных кранов, с формированием его в среде Excel (рис. 3-2). Так как число вариантов геометрических параметров не одинаковое (таблица 1), то пришлось видоизменить данную формулу. В итоге полученное число расчетных комбинаций $N=540$ для каждого варианта нагружения.

Второй этап включал создание набора геометрических моделей коробчатой балки с криволинейными стенками в среде SolidWorks (рис. 3-1) при комбинациях варьируемых геометрических параметров (таблица 1), формирование граничных

условий. Из анализа геометрических соотношений коробчатой балки получено ограничение на минимальный радиус кривизны стенки

$$R - \sqrt{R^2 - (d/2)^2} < b/2 - t_w - L_{свеса}$$

Таблица 1 – Варьируемые геометрические параметры балок

	<p>$d = 1000, 1600, 2000$ [мм] $b = 400, 600, 800$ [мм] $t_b = 10, 16, 20, 24$ [мм] $t_w = 6, 10, 12, 16$ [мм] $R = 2000, 4000, 8000$ [мм] $a/2 = 500, 1000, 2000$ [мм]</p>
---	--

На *третьем* этапе создавалась расчетная программа Geometry-StaticStructural-LinearBuckling в среде ANSYS (рис. 3-3), в которую загружалась 3D модель из среды SolidWorks с выбранными геометрическими параметрами и массив расчетных схем из среды Excel. В результате определялась критическая сила потери устойчивости, для каждой из расчетных схем.

Четвертым этапом формировался массив расчетных схем в среде Excel (рис. 3-4) путем добавления к массиву, подготовленному на этапе 1 критических сил потери местной устойчивости, рассчитанных на этапе 3.

Пятым этап определял критическое напряжение потери местной устойчивости (рис. 3-5), соответствующее нагрузке потери устойчивости и заданным геометрическим параметрам балки.

На *шестом* этапе формировался массив критических напряжений (рис. 3-6) и соответствующий ему массив геометрических параметров.

Седьмым этапом являлась аппроксимация массива полученных данных в среде MathCAD для определения инженерных зависимостей критических напряжений от геометрических параметров балки с криволинейными стенками (рис. 3-7). Расчетная зависимость выражалась в виде

$$\sigma_{cr} = A_0 \left(\frac{t_b}{d} \right)^{a_1} \left(\frac{t_w}{d} \right)^{a_2} \left(\frac{R}{d} \right)^{a_3} \left(\frac{a}{d} \right)^{a_4} \left(\frac{b}{d} \right)^{a_5}, \quad (1)$$

коэффициент и показатели которой определялись средствами регрессионного анализа. Уравнение (1) логарифмированием приводилось к виду

$$\tilde{y} = a_0 + a_1 \tilde{x}_1 + a_2 \tilde{x}_2 + \dots + a_N \tilde{x}_N = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \tilde{x}_i.$$

и вычислялась ошибка, являющаяся квадратом разности между значениями напряжений y_m , найденными с помощью ANSYS, и значений напряжений \tilde{y}_m , по уравнению (1)

$$F = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (y_m - \tilde{y}_m)^2 = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left(y_m - \left(a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \tilde{x}_{im} \right) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) представляется в виде приравнивания нулю частных производных $\frac{\partial F}{\partial a_{0,i}} = 0$ по коэффициентам a . Для сохранения размерности МПа в

коэффициент A_0 итогового выражения (1) добавлен коэффициент

$$K_{s0} = \frac{\pi^2 E}{3(1 - \mu^2)} \approx 760000 \text{ МПа}.$$

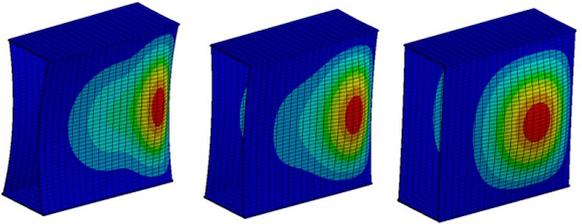
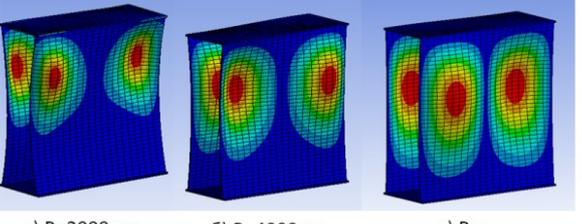
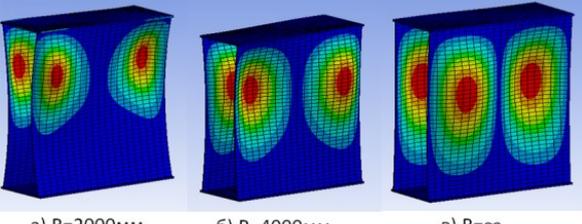
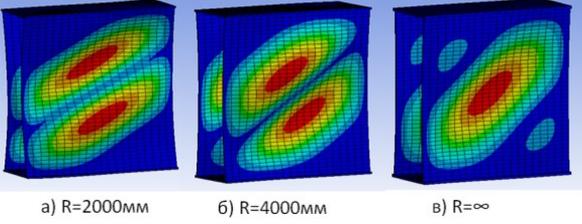
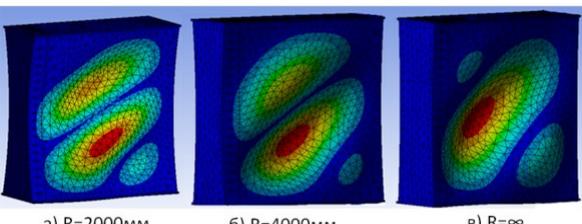
На *восьмом* этапе численного эксперимента проводился анализ полученных зависимостей (рис. 3-8) и оценка их погрешности относительно расчетов МКЭ.

Глава 3 содержит результаты численных исследований криволинейных стенок в составе коробчатых балок при различных видах нагружения: сжатие, изгиб, сжатие с изгибом, срез, срез с изгибом, и сравнения их с устойчивостью плоских стенок при тех же видах нагружения. Рассмотренные виды нагружения характерны для стенок главных балок кранов пролетного типа, стрел автомобильных, портальных кранов, экскаваторов. Для каждого вида нагружения получены инженерные зависимости определения критических напряжений, дана оценка их точности и сделан анализ влияния каждого из геометрических параметров на критические напряжения. Результаты исследования форм потери

устойчивости и полученные расчетные зависимости представлены в таблице 2.

Радиус кривизны R_∞ соответствует плоской пластине.

Таблица 2 – Изменение формы потери при увеличении кривизны и расчетные зависимости критических напряжений

Сжатие	 <p>a) R=2000мм б) R=4000мм в) R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{0.217 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_f}{d}\right)^{0.113} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{1.076}}{\left(\frac{R}{d}\right)^{0.794} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.134} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.027}}$
Изгиб	 <p>a) R=2000мм б) R=4000мм в) R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{1.466 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{0.717} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{0.952}}{\left(\frac{R}{d}\right)^{0.275} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.008} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.64}}$
Изгиб + сжатие	 <p>a) R=2000мм б) R=4000мм в) R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{0.979 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{0.063} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{1.411}}{\left(\frac{R}{d}\right)^{0.445} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.134} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.245}}$
Касательные напряжения	 <p>a) R=2000мм б) R=4000мм в) R=∞</p>	$\tau_{cr} = \frac{44.819 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{0.417} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{1.795} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.266}}{\left(\frac{R}{d}\right)^{0.589} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.605}}$
Нормальные + касательные	 <p>a) R=2000мм б) R=4000мм в) R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{6.711 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{1.175} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{1.598}}{\left(\frac{R}{d}\right)^{0.384} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.133} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.5}}$

Криволинейность стенки при сжатии приводит к локализации области потери местной устойчивости к торцам и увеличению критических напряжений σ_{cr} в

среднем в 3-4 раза. При изгибе область потери местной устойчивости смещается к верхнему поясу в зону сжатия и критические напряжения σ_{cr} увеличиваются в среднем в 1,5-3,5 раза. Средняя погрешность между МКЭ и расчетной зависимостью составляет 5,6%.

При сжатии с изгибом соотношение между изгибающей и сжимающей частью напряжений устанавливались с помощью коэффициента $\gamma = 1 - \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 1$. С уменьшением радиуса кривизны область потери устойчивости все больше смещается к верхнему поясу, но меньше, чем при изгибе, приведенные критические напряжения возрастают в среднем в 2,5-3,5 раза по сравнению с плоскими стенками. Сходимость результатов численного эксперимента МКЭ и полученной инженерной зависимости показана на рис. 4. Наилучшая сходимость наблюдается при σ_{cr} до 700 МПа. Средняя погрешность равна $\delta = 8.7\%$.



Рисунок 4 – Сравнение критических напряжений, по полученной зависимости ($\sigma_{cr, analitic}$) и МКЭ ($\sigma_{cr, ansis}$)

При сдвиге область потери устойчивости в криволинейных стенках разделяется на две части. Критические напряжения τ_{cr} увеличиваются в 1,5-4 раза. Полученная зависимость τ_{cr} во всем диапазоне исследованных параметров дает погрешность 10,9%, а при $\tau_{cr} \leq 500$ МПа составляет 6%.

При совместном действии нормальных изгибных и касательных напряжений, в соотношении 1/15..1/5 соответственно, форма меняется аналогично сдвигу.

Погрешность расчетной зависимости эквивалентных σ_{cr} до 7% наблюдается при критических напряжениях до 1000 и свыше 3000 МПа.

Анализ влияния геометрических параметров на значения критических напряжений показывает, что такими параметрами при всех видах нагрузок являются толщина стенки t_w и радиус кривизны R . На рис. 5, а такое влияние показано для случая сжатия. Однако увеличение толщины стенки значительно увеличивает массу балки, чего всегда стараются избежать. Сравнение влияния радиуса кривизны и толщины стенки на изменение массы представлено на рис.5,б.

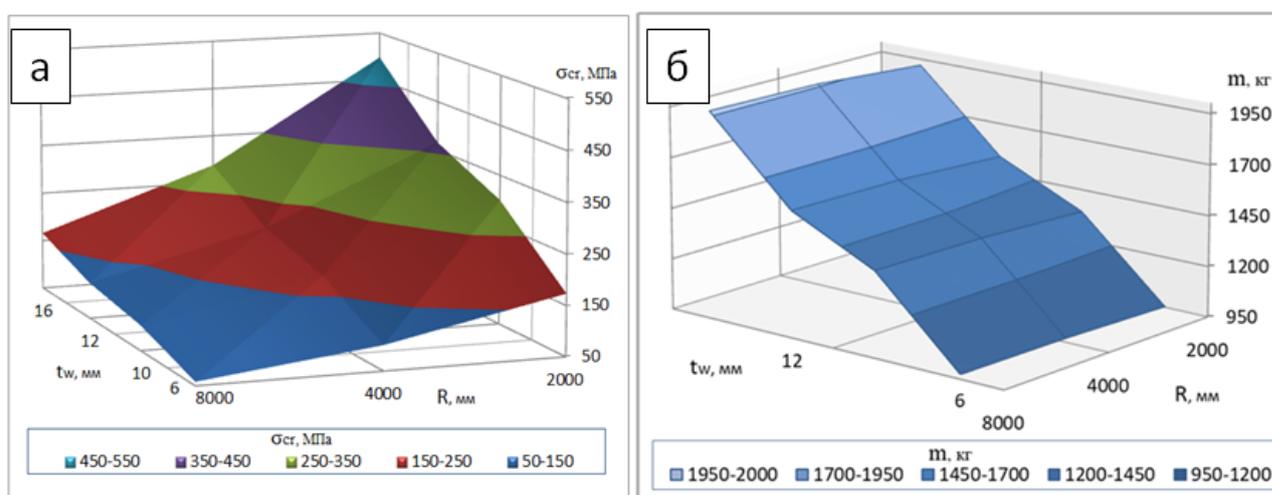


Рисунок 5- Зависимость при сжатии а) σ_{cr} от радиуса и толщины стенки при $d = 1600$ мм, $b = 600$ мм, $t_b = 10$ мм, $a = 4000$ мм, б) масса от толщины стенки и радиуса кривизны

Глава 4 содержит экспериментальную часть работы. Исследовались две консольные балки: с плоскими и с криволинейными стенками. Ограничениями по масштабу моделей и схеме нагружения являлись возможности экспериментального оборудования и предотвращение разрушения до момента потери местной устойчивости.

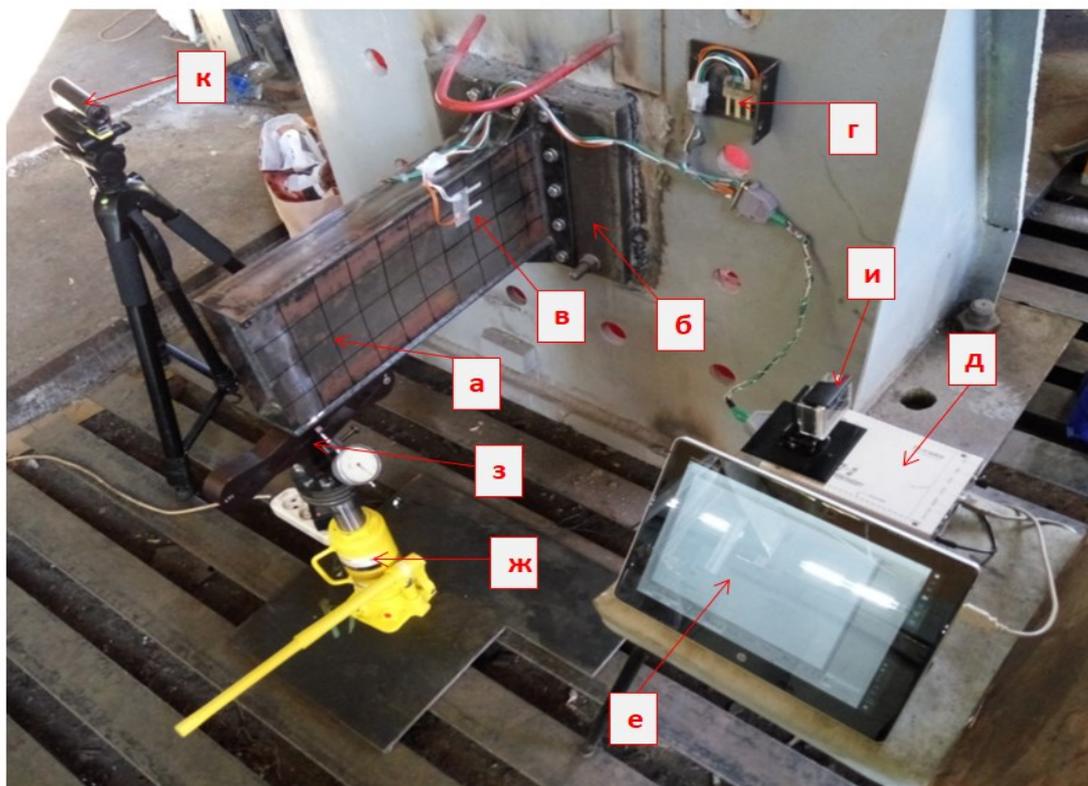
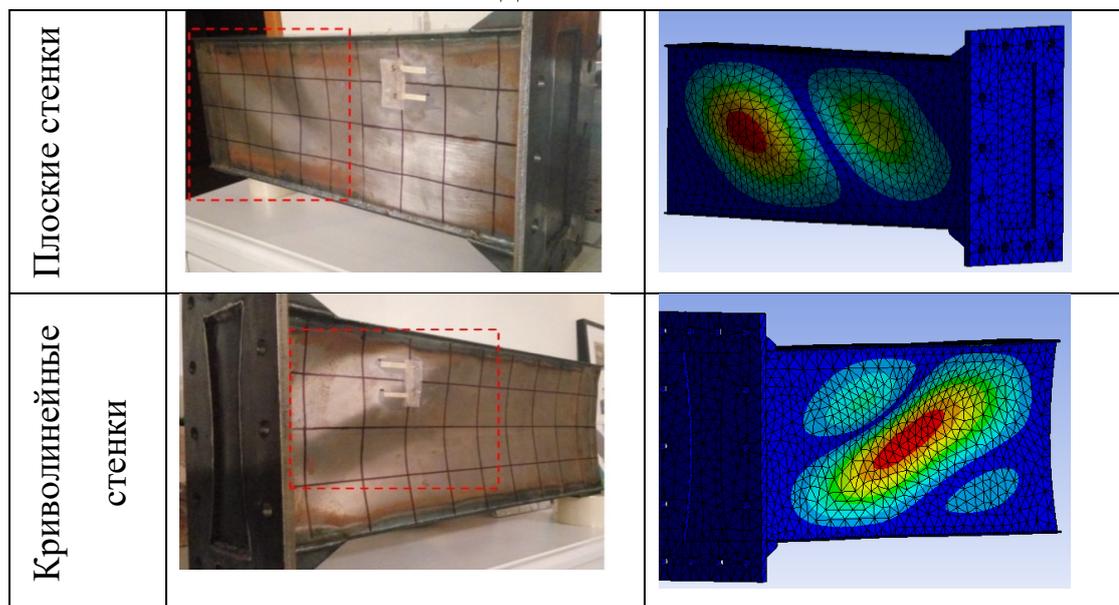


Рисунок 6 – экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рис.6. В сжатых зонах на стенки приклеены четыре тензорезистора с базой 10 мм, компенсирующие датчики выведены на станину (рис.6, г). Измерения показаний тензорезисторов производились крейтом LTR-EU-2 (рис 6, д) и передавались с помощью стандартного 25-пинового разъема на компьютер (рис 6, е). Данные обрабатывались программой LGraph2. Нагрузка создавалась пятитонным домкратом (рис 6, ж) и фиксировалась динамометром сжатия с выводом значений нагрузки на индикатор часового типа (рис 6, з). Помимо этого, эксперимент записывался двумя камерами с частотой 60 кадров в секунду (рис 7 ,и, к).

После изготовления балок проводились исследование формы стенок, они измерялись и данные переносились в расчетную модель МКЭ. В результате проведения эксперимента стенки в обеих балках потеряли местную устойчивость и форма потери устойчивости совпала с рассчитанной по модели МКЭ (табл. 3).

Таблица 3 – формы потери местной устойчивости в испытуемых образцах и в моделях МКЭ

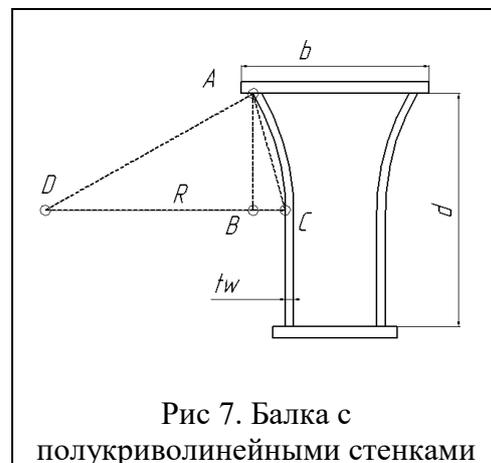


Хорошее совпадение результатов расчетов и эксперимента получено в балке с криволинейными стенками (табл. 4). Несколько худшее совпадение расчетов и эксперимента наблюдалось в балке с плоскими стенками, что можно объяснить отклонениями от плоскостности стенок в результате сварочных деформаций.

Таблица 4 – Сравнение критических напряжений и нагрузок, полученных в эксперименте и расчете

Источник данных	Коробчатая балка с плоскими стенками		Коробчатая балка с криволинейными стенками	
	Критические напряжения, МПа	Нагрузка, кН	Критические напряжения, МПа	Нагрузка, кН
Экспериментальное исследование	230	19,1	560	30,2
Метод конечных элементов	308	19,8	539	32,2
Расчет по зависимостям	ГОСТ 33169-2014	162	-	-
	полученная	-	-	487

В главе **главе 5** рассматривается балки со стенками, имеющими кривизну только в верхней части. Так как анализ форм потери местной устойчивости криволинейных стенок показал, что образующаяся при изгибе бухтина смещается к верхнему сжатому поясу, а нижняя часть криволинейной стенки в потере устойчивости не участвует, то кривизну целесообразно вводить только в верхней части стенки, в результате чего можно уменьшить массу балки. Такие стенки будем называть полукриволинейными (рис. 7). Для оценки эффективности использования данной геометрии был проведен численный эксперимент по методике, описанной в главе 2.



По данным исследований установлены формы потери устойчивости стенок, определены критические напряжения и для их оценки получены расчетные зависимости при каждом из рассматриваемых видов нагружения (таблица 5).

В результате установлено, что:

- балки с полукриволинейными стенками по сравнению с балками с плоскими стенками обладают меньшей массой (сужение нижнего пояса) и имеют более высокие характеристики местной устойчивости в 1,5 - 4 раза в зависимости от вида нагружения;

- полукриволинейные стенки при сравнении с криволинейными снижают массу балки, но не дают преимущества в устойчивости; при $\sigma_{cr} \leq 500$ МПа показывают одинаковые значения критических напряжений, поэтому целесообразность их применения может рассматриваться, когда определяющим критерием является масса;

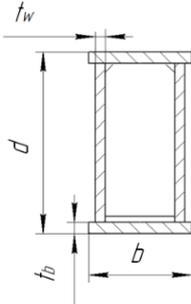
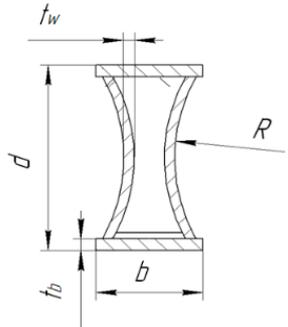
- при остальных видах нагружения устойчивость полукриволинейных стенок ниже по сравнению с криволинейными, поэтому вопрос об их использовании должен решаться выбором оптимального критерия - по массе или по критическим напряжениям.

Таблица 5 – формы потери устойчивости и зависимости критических напряжений в балках с плоскими, криволинейными, полукриволинейными стенками

Сжатие	<p>а) полукриволинейная стенка R=2000мм б) криволинейная стенка R=2000мм в) плоская стенка R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{0.708 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{0.108} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{1.558}}{\left(\frac{R}{d}\right)^{0.293} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.101} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.008}}$
Изгиб	<p>а) полукриволинейная стенка R=2000мм б) криволинейная стенка R=2000мм в) плоская стенка R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{1.38 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{2.582}}{\left(\frac{t_b}{d}\right)^{0.917} \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{0.133} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.131} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.095}}$
Изгиб + сжатие	<p>а) полукриволинейная стенка R=2000мм б) криволинейная стенка R=2000мм в) прямолинейная стенка R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{7.55 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{2.29}}{\left(\frac{t_b}{d}\right)^{0.725} \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{0.323} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.127} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.51}}$
Сдвиг	<p>а) полукриволинейная стенка R=2000мм б) криволинейная стенка R=2000мм в) плоская стенка R=∞</p>	$\tau_{cr} = \frac{8.28 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{6.532} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0.483} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.611}}{\left(\frac{t_b}{d}\right)^{5.215} \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{0.503}}$
Изгиб+ сдвиг	<p>а) полукриволинейная стенка R=2000мм б) криволинейная стенка R=2000мм в) плоская стенка R=∞</p>	$\sigma_{cr} = \frac{1.029 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{3.902} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0.046}}{\left(\frac{t_b}{d}\right)^{2.308} \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{0.094} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{2.27}}$

В главе 6 представлен пример сравнительного проектирования металлоконструкции мостового крана, главные балки которой выполнены с криволинейными и плоскими стенками. Рассматривался двухбалочный мостовой кран с тележкой грузоподъемностью $Q_T=75$ т, пролетом $L=32$ м. Особенностью проектирования являлось совмещение проектировочного и поверочных расчетов металлоконструкции в среде конечно-элементного моделирования при варьировании геометрических параметров и одновременном выполнении условий прочности, жесткости, местной устойчивости и минимальной массы. Допускаемые напряжения принимались равными 160 МПа, жесткость ограничивалась условием $f_z/L \leq 1/750$. Твердотельная модель металлоконструкции крана создавалась в среде SolidWorks (таблица 6) Структура проекта нахождения оптимального поперечного сечения балки включала блок с 3D моделью, экспортированной из среды SolidWorks, блок расчета на прочность, блок ранжирования переменных геометрических параметров. Промежуточным результатом блока ранжирования являлась зависимость действующих напряжений от высоты и ширины балки. Завершающим блоком - определение сечений по критерием минимальной массы, допускаемого напряжения и прогиба.

Таблица 6 – Характеристика сечений главных балок

Балка с плоскими стенками	Балка с криволинейными стенками
	
<p>Варьируемые параметры $d = 1600 - 2400$ мм; $b = 600 - 1000$ мм; $t_w = 10, 9, 8$ мм; Постоянные параметры $t_b = 15$ мм</p>	<p>Варьируемые параметры $d = 1600 - 2400$ мм; $b = 600 - 1000$ мм; $R = 2000 - 8000$ мм $t_w = 10, 9, 8$ мм; Постоянные параметры $t_b = 15$ мм</p>

Так как плоские стенки не удовлетворяли условиям местной устойчивости при стремлении к минимуму массы, то в такие балки вводились продольные ребра жесткости и диафрагмы. Балки с криволинейными стенками показали устойчивость без введения продольных ребер и промежуточных диафрагм. По результатам расчета в Ansys оказалось 9 конкурирующих сечений, удовлетворяющих условиям прочности, жесткости и местной устойчивости (варианты с недостаточной криволинейных стенок устойчивостью исключены), и имеющих массу близкую к оптимальной, представленных в таблице 7.

Таблица 7 – массы балок с криволинейными и плоскими стенками

Балки с плоскими стенками						
№	tb, мм	tw, мм	b, мм	d, мм	Масса, кг	
1	15	10	602	2050	31575	
2	15	10	643	2028	32017	
3	15	10	686	2014	32574	
4	15	9	638	2394	33198	
5	15	9	662	2359	33288	
6	15	9	683	2326	33357	
7	15	8	665	2394	31229	
8	15	8	703	2333	31359	
9	15	8	682	2226	30232	
Балки с криволинейными стенками						
№	tb, мм	tw, мм	R, мм	b, мм	d, мм	Масса, кг
1	15	10	5879	640	2103	31076
2	15	10	4101	632	2169	31618
3	15	10	3064	644	2228	30086
4	15	9	3311	671	2172	29486
5	15	9	2406	716	2205	потеря устойчивости
6	15	9	4694	625	2131	29021
7	15	8	5632	613	2262	27780
8	15	8	6817	617	2287	27441
9	15	8	7805	632	2269	потеря устойчивости

По критерию массы такими балками являются балка №9 с плоскими стенками, массой 30232 кг, и балка №8 с криволинейными стенками, массой 27441 кг. Разница в массе между ними составляет 2791 кг легче.

Еще более значительных преимуществ в использовании балок с криволинейными стенками следует ожидать в телескопических стрелах самоходных кранов, в которых используют высокопрочные стали, а ребра и диафрагмы.

Основные результаты и выводы

1. Конечно-элементными расчетами и экспериментальными проверками доказано, что криволинейные стенки в коробчатых балках обладают повышенными характеристиками местной устойчивости при различных видах нагружения, по сравнению с плоскими стенками.
2. Разработана методика проведения численных исследований местной устойчивости, основанная на комбинации CAD/CAE программ, электронных таблиц и средств вычислительной математики, позволяющая создавать, рассчитывать конечно-элементные модели и получать инженерные зависимости критических напряжений в зависимости от влияния геометрических параметров балки.
3. В результате проведения многочисленных конечно-элементных расчетов изучены формы потери устойчивости криволинейных стенок при сжатии, изгибе, срезе и комбинации этих нагружений и определены критические напряжения потери их устойчивости при этих нагружениях.
4. Получены инженерные зависимости для расчета критических напряжений местной устойчивости криволинейных стенок в коробчатых балках, учитывающие все их основные геометрические размеры и различные условия нагружения. Особенностью этих зависимостей является одновременный учет условий закрепления криволинейных пластин и оценки эквивалентных критических напряжений при комбинированном нагружении. Наибольшая погрешность оценки критических напряжений по полученным

инженерным зависимостям по сравнению с расчетами МКЭ находится в диапазоне 5,4% - 12,4% для различных рассмотренных вариаций геометрических параметров и комбинаций нагружения.

5. Сравнение критических напряжений устойчивости изогнутых по радиусу стенок с плоскими стенками в составе коробчатых балок показало, что они выше в криволинейных стенках при сжатии в 3-4 раза, при изгибе в 1,5-3,5 раза, при комбинации сжатия с изгибом в 2,5-3,5 раза, при сдвиге в 1,5-4 раза, при комбинации изгиба со сдвигом в 1,5-3 раза в зависимости от вариации геометрических параметров.

6. Проведено экспериментальное исследование стальных тонкостенных коробчатых балок с радиусными и плоскими стенками при консольном изгибе, показавшее увеличение критических напряжений в криволинейных стенках в 2,4 раза. Экспериментальное значение критических напряжений местной устойчивости в криволинейной стенке выше рассчитываемых по предлагаемой инженерной зависимости на 9,6%, то есть отклонением в запас устойчивости.

7. Исследование балок с полукриволинейными стенками показало, что они обладают меньшей массой за счет снижения числа диафрагм, продольных ребер и повышенной устойчивостью стенок по отношению к балкам с плоскими стенками, однако имеют меньшую жесткость и прочность. Поэтому их целесообразно использовать, когда определяющими критериями являются масса и местная устойчивость. Устойчивость полукриволинейных стенок сопоставима с криволинейными при изгибе до значений $\sigma_{cr} < 800$ МПа, при сдвиге до значений $\sigma_{cr} < 400$ МПа. В остальных случаях геометрического исполнения балок и нагружения их устойчивость ниже чем криволинейных стенок.

Список опубликованных работ

Из журналов перечня ВАК:

1. Манжула К.П., Наумов А.В. Оптимизация геометрии и массы коробчатой балки с криволинейными стенками при расчете на местную устойчивость от изгибающего момента / К.П. Манжула, А.В. Наумов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. - 2019. - № 4. - 481-487 с.

Из журналов перечня SCOPUS:

2. Manzhula K.P., Naumov A.V. Influence of flections' radius value to local buckling of box-shaped beams with non-linear walls. International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), 2017. Vol. 11, n. 5

3. Manzhula K., Naumov A., Sokolov S. Local Buckling of Box-Shaped Beams Due to Skew Bending. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 337, 2019. 1-8

4. Manzhula K., Valiulina A., Naumov A. Influence of Fixation Stiffness to Curved Plates Buckling Due to Compression. Advances in Mechanical Engineering, 2021. 215-224

Работы, вошедшие в издания не из перечня ВАК и SCOPUS:

5. Манжула К.П., Наумов А.В. Анализ местной устойчивости элементов коробчатой балки с криволинейными стенками / К.П. Манжула, А.В. Наумов // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. - 2016. - 70-73 с.

6. Манжула К.П., Наумов А.В. Анализ методик расчета пластин на местную устойчивость / К.П. Манжула, А.В. Наумов // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. - 2017. - 354-356 с.

7. Манжула К.П., Наумов А.В. Влияние кривизны стенок коробчатых балок на местную устойчивость / К.П. Манжула, А.В. Наумов // Современное машиностроение: Наука и образование. Изд. Политехн. уни-та. - 2016 - 824-830 с.

8. Манжула К.П., Наумов А.В. Местная устойчивость криволинейных стенок коробчатых балок при сжатии с изгибом/ К.П. Манжула, А.В. Наумов // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2017. - № 6. - 765-773 с.

9. Манжула К.П., Наумов А.В. О местной устойчивости балок с плоскими и криволинейными стенками / К.П. Манжула, А.В. Наумов // Сборник докладов XXI Международной научно-технической конференции МИСИ – МГСУ. - 2018.

10. Наумов А.В. Ездовые балки с криволинейными стенками. Наземные транспортно-технологические комплексы и средства / А.В. Наумов // Материалы Международной научно-технической конференции под общ.редакцией Ш. М. Мерданова. Тюмень. ТИУ. - 2016. - 195 – 200 с.

11. Наумов А.В., Манжула К.П. Условие перехода местной устойчивости криволинейной стенки коробчатой балки к поясу / А.В. Наумов, К.П. Манжула // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. - 2016. - 343-345 с.

12. Наумов А.В., Манжула К.П. Расчетно-экспериментальное исследование местной устойчивости коробчатых балок с криволинейными стенками / А.В. Наумов, К.П. Манжула // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки - 2019. - Т. 25. - № 3. - 108-119 с.