

Прочностные характеристики тонкостенных элементов

Е.Л. Яковлева ¹, И.В. Атавин ^{2*}, Ю.Д. Казакова ³, И.Х. Максудов ⁴

¹⁻⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

doi: 10.18720/CUBS.63.7

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 04.10.2017

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

легкая стальная тонкостенная конструкция;
ЛСТК;
строительные конструкции;
строительная механика;
балка;
испытание;

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена оценке прочностных характеристик тонкостенного стеллажа составного профиля и полки. Рассмотрены случаи загрузки равномерно распределенной нагрузкой балки длиной 1,5 метра с различными значениями эксцентриситета её поперечного сечения. Получены значения прогибов и предельных нагрузок. Результаты натурных испытаний будут сравниваться с результатами электронных расчетов, произведенных в специализированном программном комплексе.

Содержание

1.	Введение	126
2.	Методика.	128
3.	Выводы и рекомендации	134

Контактная информация:

1	+78125526303, helena47@mail.ru (Яковлева Елена Леонидовна, к. т. н., доц.)
2*	+79992848463, ilya_region51@mail.ru (Атавин Илья Вадимович, студент)
3	+79500376742, permkim5@gmail.com (Казакова Юлия Дмитриевна, B.Sc., студент)
4	+79104432402, mcsoodoff@gmail.com (Максудов Ильхомжон Хуснитдин Угли, студент)

1. Введение

В строительной отрасли развитых стран мира применяются металлические конструкции при возведении зданий и сооружений. Внедрение новых технологий строительства, а также рост производства позволяет считать металл одним из перспективных материалов.

Особое внимание уделяется конструкциям, состоящим из легких стальных холодногнутых профилей (ЛСТК). Низкая металлоемкость, рациональные размеры и сечение, транспортировка и легкость монтажа являются основными преимуществами ЛСТК.

В России распространение ЛСТК затруднено отсутствием достаточных нормативных и методических документов, без которых возникают сложности с расчетом, строительством и последующей эксплуатацией подобных конструкций. Анализируя мировой опыт, можно сделать вывод о возможности использования в текущих расчетах такие нормы и стандарты, как Еврокод-3 и AJSJ.

Для оценки прочностных и эксплуатационных характеристик новых видов сечений, необходимо производить расчет с помощью программных комплексов, а также, выполнить серию натурных испытаний, которые подтвердят или опровергнут результаты расчёта.

В начале 20-го века стало актуальным применение тонкостенных элементов и конструкции в строительстве.

В основу исследований деформирования тонкостенных конструкций положены работы С.П. Тимошенко [1,2]. В ходе экспериментов были определены крутильная жесткость стержня открытого профиля, центр изгиба, изучено поведение профилей различного вида.

В.З. Власовым [3,4,5] опубликованы теории расчета тонкостенных конструкций открытого профиля на устойчивость, теории кручения и изгиба тонкостенных конструкций, а также решена задача потери устойчивости при приложении силы вне "круга устойчивости". Работа А.А. Уманского [6] предлагала иное, более полное решение задачи на изгиб тонкостенных элементов в случае воздействий стесненного кручения.

Значительный вклад в изучение легких тонкостенных конструкций внес Д.В. Бычков [7, 8]. Им в соавторстве с А.К.Мрочинским [9] были разработаны расчетные алгоритмы для балок с разным числом пролетов и получены соотношения, определяющие усилия при кручении, с учетом закрепления концов. Показано, что при расчете балок и рамных конструкций из тонкостенных элементов с применением методов сил и перемещений можно учитывать стесненное кручение.

В диссертации А.Р.Туснина [10] рассматривается применение метода конечных элементов для решения задач деформирования с учетом влияния изгиба и кручения на тонкостенные элементы, поведение конструкций при различных видах узловых соединений, а также внесены поправки, позволяющие учитывать положения центра тяжести, прогиба, эксцентриситета.

Исследование [11], проведенное Рыбаковым В.А., посвящено изучению усовершенствованных методов расчета конструкций из тонкостенных профилей. Автором исследований [12] подняты вопросы надежности и долговечности тонкостенных конструкций, приведены и обоснованы недостатки российской нормативной базы, предложены возможные пути исправления ситуации.

В материалах работы [13] рассмотрены основные направления применения легких стальных тонкостенных конструкций в строительной отрасли, примеры реального использования и описание их технологических особенностей.

В работе [14] предложена методика расчета тонкостенных составных элементов, которая учитывает потерю местной устойчивости, форму сечения профиля при общей потере устойчивости по предельно-напряженному состоянию (коэффициенты устойчивости приведены в работе).

В руководстве [15,16] приведена технология усиления железобетонных конструкций композиционными материалами. Рассмотрены вопросы качества выполнения работ, требования к исходным материалам и условиям проведения работ, по усилению конструкции, а также требования по обязательному мониторингу усиливаемой конструкции.

В статьях [17,18,19] рассмотрено применение методики расчета легких стальных конструкций в расчетах накопления повреждения.

В работах [20,21,22] представлены правила, формулы, основные виды и характеристики тонкостенных элементов. Рассмотрены основные расчетные ситуации, предложены рекомендации. В

статьях [23,24] рассмотрено применение программных комплексов при исследовании тонкостенных конструкций, приводится сравнение результатов расчетов с данными натурных испытаний.

Вопросы поведения тонкостенных конструкций из элементов профиля закрытого типа в условиях воздействий температур, от нормальных до аномально высоких (возникающих при пожаре), предельных стрессовых нагрузок разобраны в [25,26].

Авторами [27,28] рассматривается поведение тонкостенных конструкций, собранных из элементов с полуоткрытыми профилями. В работах [29,30] рассмотрена зависимость деформаций и прогибов тонкостенных элементов, нагрузка к которым приложена с различными эксцентриситетами.

В исследованиях [31,32,33,34] представлены примеры определения предела прочности конструкций из различных материалов с помощью методов неразрушающего контроля, моделирования поведения данных конструкций с помощью применения различных конечных элементов, сравнение численных и экспериментальных результатов работы.

Статьи [37,38] посвящены обзору отечественных и зарубежных публикаций по теме устойчивости холодногнутого тонкостенного профиля при работе на изгиб. Проведенный обзор работ содержит как теоретические, основанные на стержневом и оболочечном моделировании работы конструкций, так и экспериментальные результаты исследований. Обращено внимание на публикации, содержащие комплексный анализ проблемы, включающий сравнение аналитических и экспериментальных результатов.

В работах [39,40] предложена методика моделирования расчетной схемы конструкции пролетного строения надземного пешеходного перехода и рассмотрен вопрос о влиянии вида расчетной схемы конструкции на параметры используемых сечений холодногнутых профилей. Предлагаемая модель позволяет проводить дальнейшие исследования в области расчета и проектирования конструкций пролетного строения надземных пешеходных переходов на основе тонкостенных холодногнутых профилей.

Авторами работ [41,42,43] представлена вычислительная система «Сталькон» для статического расчета и проверки на несущую способность стальных стержневых конструкций с учетом нормативных требований. Система разработана на кафедре металлических конструкций МГСУ. Приведен пример расчета прямолинейной стойки с шарнирно-неподвижным нижним и шарнирно-подвижным верхним концами. Так же рассматриваются вопросы численного расчета пространственных металлических конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. Анализируется возможность использования вычислительных комплексов NASTRAN и ANSYS, в состав которых включены стержневые тонкостенные конечные элементы, учитывающие стесненное кручение.

Целью работ [44,45,46] является разработка численного метода расчета тонкостенных стержневых систем по полусдвиговой и бессдвиговой теориям. В статьях приводятся результаты построения и тестирования различных конечных элементов тонкостенного стержня открытого профиля, работающего на кручение с учетом деформаций сдвига.

Авторами работ [47–49] представлены теоретические основы методики редуцирования основанной на учете изменения несущей способности профиля. Полученные результаты сопоставлены между собой, и сделан вывод о редуцировании поперечного сечения. Для рассматриваемого профиля определена эффективная (расчетная) площадь поперечного сечения, учитывающая возможность потери местной устойчивости. Выполнены линейный и нелинейный конечно-элементный анализ сжато-изгибаемого стального элемента с двойным гофрированием. Результаты расчетов сопоставлены с результатами натурных экспериментальных исследований. Выявлены особенности работы стального элемента с двойным гофрированием. Приведены результаты натурных испытаний фермы пролетом 18 м из тонкостенных холодногнутых профилей с цинковым покрытием. Произведено сравнение теоретических и экспериментальных данных. конструкции в целом.

Целью данной работы является оценка прочностных характеристик стальных тонкостенных элементов, таких как балка и полки, геометрические характеристики которых приведены ниже, а также определение характеристик совместной работы данных элементов. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Создание установки для проведения натурных испытаний с тонкостенными конструкциями;
- Построение аналитической конечно-элементной модели конструкций в программном комплексе Ansys, сравнение полученных результатов с результатами натурных испытаний;
- Определение эксплуатационных и предельных нагрузок для исследуемых конструкций.

2. Методика.

2.1 Оценка прочности горизонтальных несущих балок

Форма поперечного сечения тонкостенной балки закрытого типа и её геометрические характеристики приведены на рис. 1. По торцам балки приварены гребенчатые зацепы.

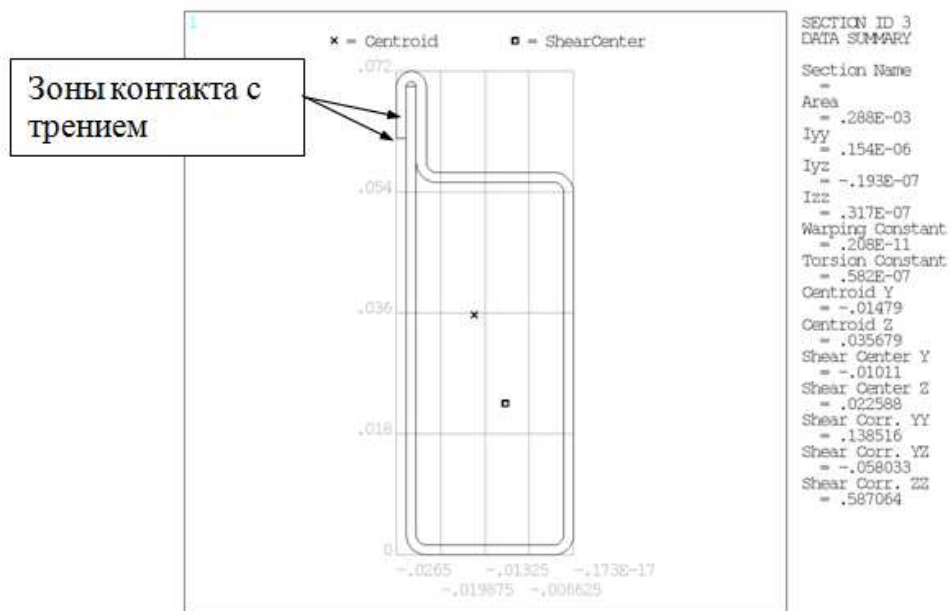


Рисунок 1. Поперечное сечение горизонтальной несущей балки и её геометрические характеристики

Балки изготавливаются из стальной ленты БТ–ПН–2,0 ГОСТ 19904–90. Лента толщиной 1,2÷2,0 мм обладает прочностной изотропией в продольном и поперечном направлениях, предел текучести $\sigma_T = 230$ МПа.

Стоит отметить, что профиль балки не является монолитным, имеются зоны контакта с трением. Сварка в продольном направлении не производится. Тем не менее особенности контура, крепления торцов к зацепам и форма приложения внешней нагрузки позволяют считать поперечное сечение балки монолитным.

Особенность балочного варианта стеллажа при определении его нагрузочной способности обусловлена наличием соединения балка-стойка посредством гребенчатого зацепа. Данное соединение является соединением типа упругий шарнир, жесткость которого может существенным образом влиять как на прочность отдельных балок в составе конструкции, так и на устойчивость конструкции в целом.

Жесткость соединения балка-стойка существенно влияет на устойчивость стеллажа и практически не влияет на прочность несущих балок. Поэтому оценку прочности балок следует проводить в запас по схеме двухточечного шарнирного опирания, при этом поворот вокруг собственной оси балки запрещен. Предварительные оценки показали, что для данного типа сечения балки тип закрепления торцов по углу поворота вокруг вертикальной оси существенно влияет на прогиб балки в горизонтальной плоскости, при этом влияние на прочность балки незначительно. Поэтому для оценки в запас прочности поворот балки вокруг вертикальной оси следует в расчетах принять свободным.

Эксплуатация балочных стеллажей происходит таким образом, что обеспечивается равномерная по длине балок загрузка. Поэтому расчет предельной нагрузки по условию прочности (перехода в пластическое состояние) проводится в предположении равномерно распределенной нагрузки. Передача нагрузки на балки происходит через полки, лежащие в пазах между двумя балками. Поэтому загрузка балок происходит с эксцентриситетом, который при увеличении нагрузки меняется. Необходимо провести оценку влияния эксцентриситета приложения нагрузки на величину предельной нагрузки. Из конструктивных соображений эксцентриситет может меняться от 5 мм до 17 мм, отсчёт производится от правой стенки сечения (рис. 1).

Для расчетной оценки прочности балок были построены конечно-элементные модели (рис. 2) и проведена серия расчетов напряженно-деформированного состояния. На рис. 3 и рис. 4 приведены распределения вертикальных и горизонтальных перемещений, а также напряжений по Мизесу в расчете на 10 кН суммарной нагрузки на балку.

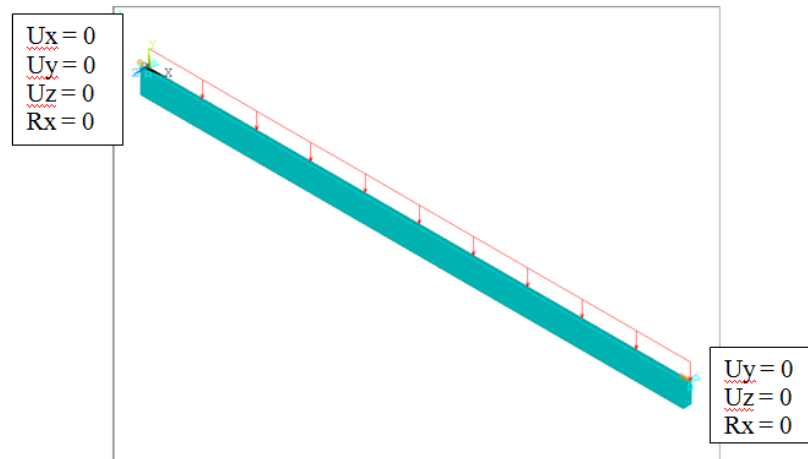


Рисунок 2. Расчетная модель балки

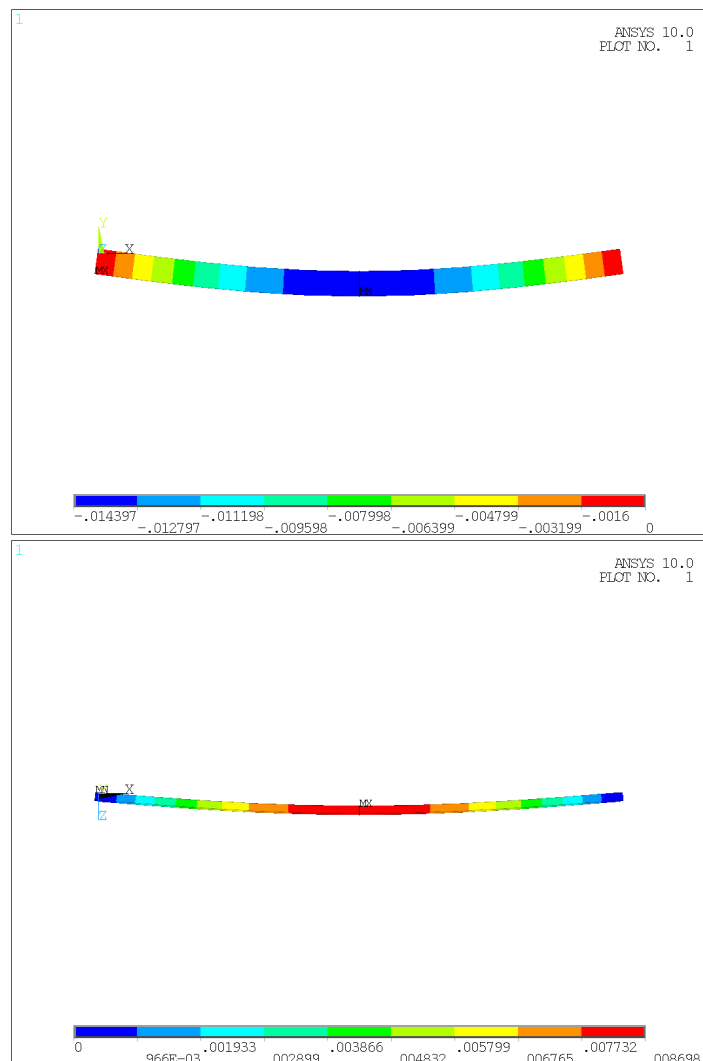


Рисунок 3. Распределения вертикальных (слева) и горизонтальных (справа) перемещений в балке длиной 1500 мм (суммарная нагрузка на балку 10 кН)

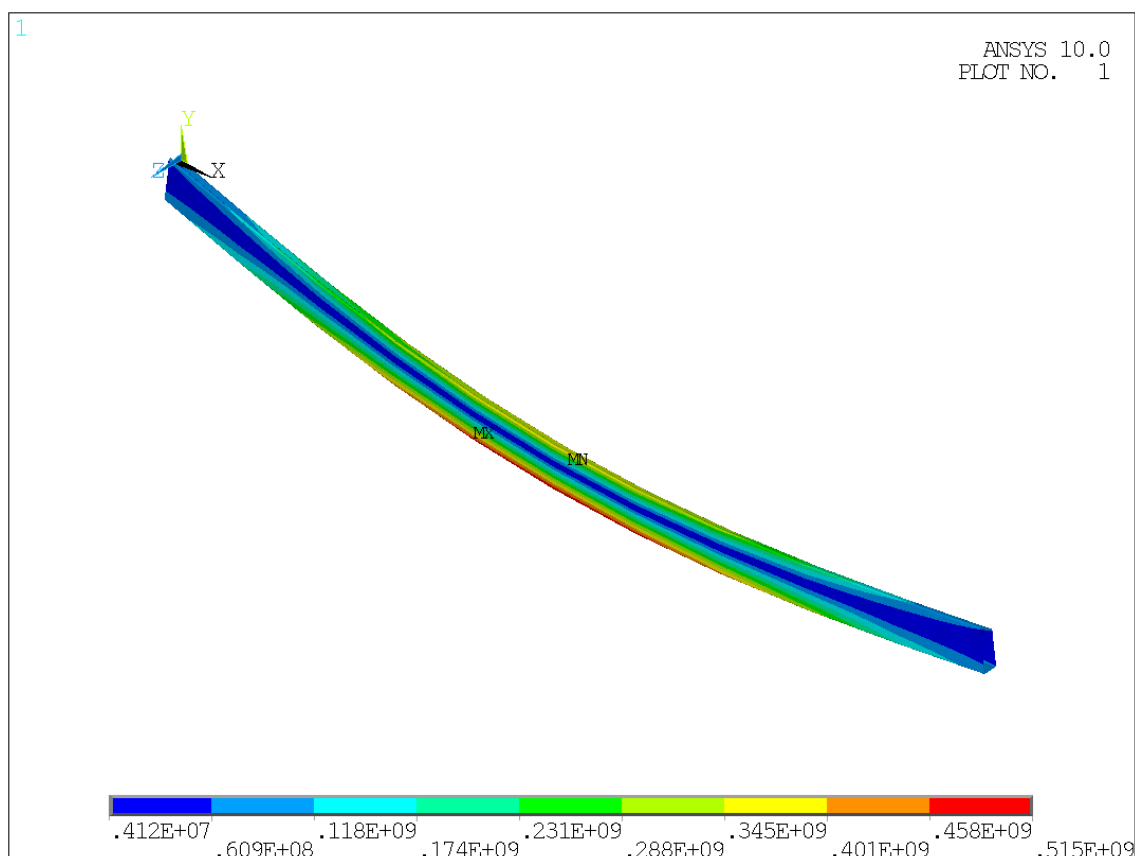


Рисунок 4. Распределение напряжений по Мизесу в балке длиной 1500 мм (суммарная нагрузка на балку 10 кН)

По условию текучести Мизеса определены величины предельных нагрузок и прогибов (табл. 1), соответствующих началу пластического течения.

Таблица 1. Величины предельных нагрузок и прогибов балок, соответствующих переходу в пластическое состояние

Тип балки	Эксцентриситет приложения нагрузки, мм	Предельная нагрузка на одну балку, кН	Вертикальный прогиб, мм	Горизонтальный прогиб, мм
Балка 1500	5	4,47	6.43	3.88
	10	4,47	6.42	3.86
	15	4,47	6.43	3.91
	17	4,47	6.44	3.92

Из табл. 1 видно, что для данного типа профиля поперечного сечения балки эксцентриситет приложения нагрузки в рабочем диапазоне не оказывает значительного влияния на напряженно-деформированное состояние.

В соответствии с ГОСТ 28766-90 п. 3.5 несущие балки стеллажей должны удовлетворять условию жесткости: упругий прогиб балки от сил тяжести грузов в их нормативном значении не должен превышать 1/200 длины пролета этой балки.

Под нормативным значением следует понимать значение нагрузки с учетом коэффициента надежности по нагрузке, который принимается равным 1,25. В табл. 2 приведены величины предельных нагрузок и прогибов балок, удовлетворяющие условиям прочности и жесткости.

Таблица 2. Величины предельных нагрузок и прогибов балок, удовлетворяющие условиям прочности и жесткости

Тип балки	Предельная нагрузка на пару балок, кН	Вертикальный прогиб, мм	Горизонтальный прогиб, мм
Балка 1500	8,93	6.4	3.9

С учетом коэффициента запаса **1,25** эксплуатационные нагрузки на балки следует принять не превышающими значений, приведенных в табл. 3.

Таблица 3. Величины максимальных эксплуатационных нагрузок и прогибов балок

Тип балки	Нагрузка на пару балок, кН	Вертикальный прогиб, мм	Горизонтальный прогиб, мм
Балка 1500	7,14	5.1	3.1

Если, исходя из конструктивных соображений, требуется удовлетворить ограничению на величину горизонтального прогиба балок, необходимо снизить эксплуатационные нагрузки пропорционально величине горизонтального прогиба.

Достоверность выполненных расчетов подтверждается результатами экспериментов, выполненных для балок длиной 1500 мм в составе конструкции стеллажа. Нагрузка на пару балок, при которой еще не проявилось пластическое состояние составила 11,42 кН, вертикальный прогиб 6,5 мм. Также был проведен расчет предельной нагрузки по условию начала пластического течения для пары балок длиной 1500 мм. Результаты расчетов таковы: предельная нагрузка на пару балок составляет 10,72 кН, т.е. меньше 11,42 кН; вертикальный прогиб составляет 7,2 мм, т.е. больше 6,5 мм. Таким образом, можно сделать вывод о практической достоверности полученных результатов расчетов.

2.2 Оценка прочности несущих полок

В качестве грузонесущих элементов применяются тонкостенные полки различных типоразмеров. Существует два варианта полок: для передачи нагрузки на балки 300x600, 300x800, для складирования грузов на стеллажах полочного типа 300x1206, 400x1206, 500x1206, 600x1206.

Полки изготавливаются из стальной ленты БТ–ПН–2,0 ГОСТ 19904–90. За расчетную величину предела текучести принято значение $\sigma_T = 230$ МПа .

В качестве расчетной модели полки была принята модель шарнирно опертого по контуру равномерно нагруженного прямоугольного листа (рис. 5).

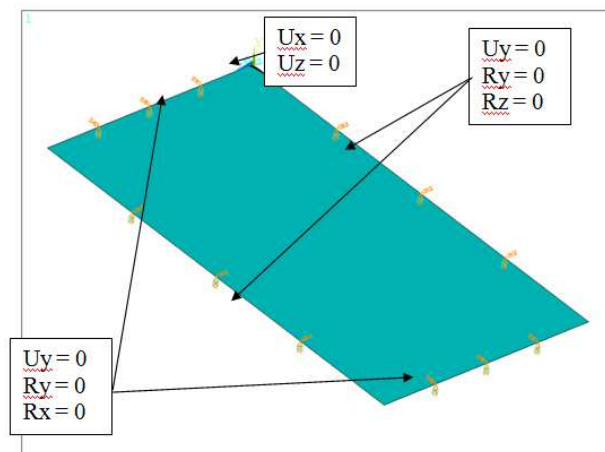


Рисунок 5. Расчетная модель полки

Проведена серия конечно-элементных расчетов напряженно-деформированного состояния полок различных типоразмеров. Моделирование осуществлялось с помощью конечных элементов, удовлетворяющих теории упругих оболочек малой толщины. Важным аспектом расчетов является учет геометрической нелинейности (малые упругие деформации, большие повороты). Расчеты по линейной теории оболочек представляются неудовлетворительными, т.к. прогибы в этом случае имеют порядок нескольких десятков сантиметров при нагрузке близкой к предельной по условию прочности, что не подтверждается результатами экспериментов.

На рис. 6 и рис. 7 представлены результаты КЭ анализа (вертикальные прогибы и напряжения по Мизесу) для полки 600x1206 в расчете на 1 кН суммарной нагрузки на полку.

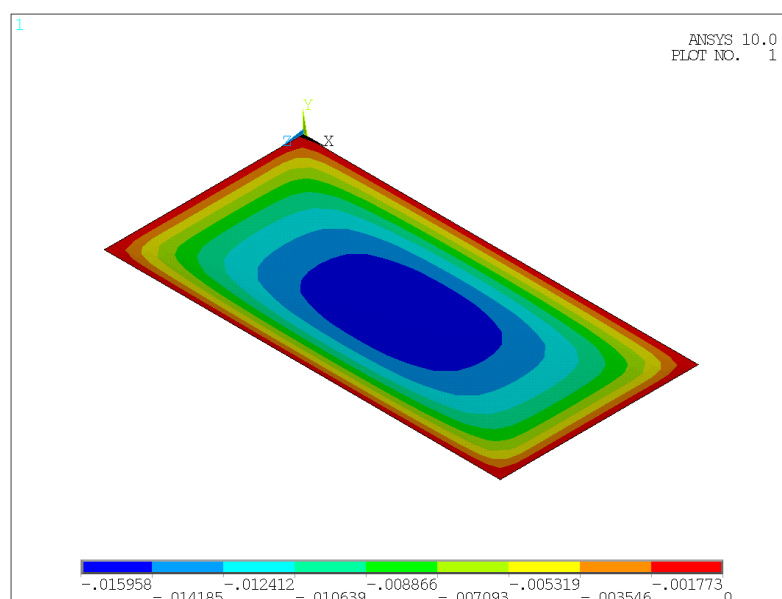


Рисунок 6. Вертикальный прогиб полки 600x1206 (нагрузка 1 кН)

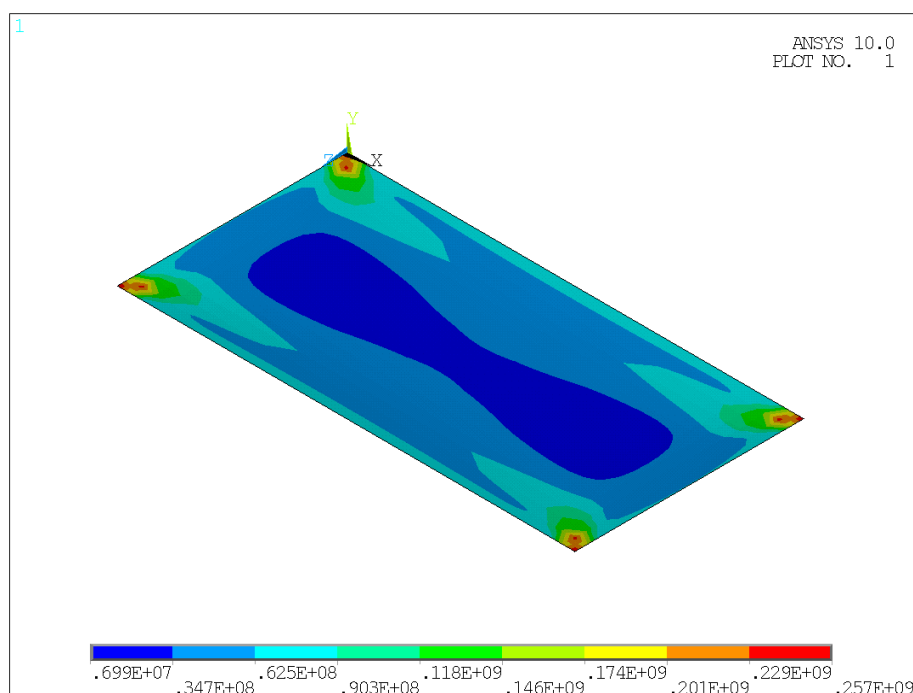


Рисунок 7. Напряжения по Мизесу в полке 600x1206 (нагрузка 1 кН)

В табл. 4 приведены значения предельных нагрузок и прогибов, удовлетворяющих условию перехода в пластическое состояние.

Таблица 4. Величины предельных нагрузок и прогибов полок, удовлетворяющие условию прочности

Тип полки	Предельная нагрузка на полку, кН	Вертикальный прогиб, мм
300x1206	1,15	15.2
400x1206	0,98	15.2
500x1206	0,92	15.2
600x1206	0,89	15.2
300x600	0,85	8.3
300x800	0,94	10.6

С учетом коэффициента запаса **1,25** эксплуатационные нагрузки на полки следует принять не превосходящими значений, приведенных в табл. 5.

Таблица 5. Величины максимальных эксплуатационных нагрузок на полки

Тип полки	Нагрузка на полку, кН
300x1206	0,92
400x1206	0,78
500x1206	0,73
600x1206	0,71
300x600	0,68
300x800	0,75

Выбранная расчетная схема полок и методика расчета подтверждается данными эксперимента, выполненного для полки 600x1206 в составе конструкции стеллажа. Предельная нагрузка на полку по условию перехода в пластическое состояние в эксперименте составила $0,9 \pm 1$ кН, вертикальный прогиб 15 мм. Максимальная разрушающая нагрузка составила 1,45 кН, вертикальный прогиб при этом составил 21 мм. Сравнение результатов эксперимента и расчетов представлено на рис. 8 в виде зависимости прогиба в центре полки от величины приложенной нагрузки.

Зависимость прогиба в центре полки 600x1206 от приложенной нагрузки

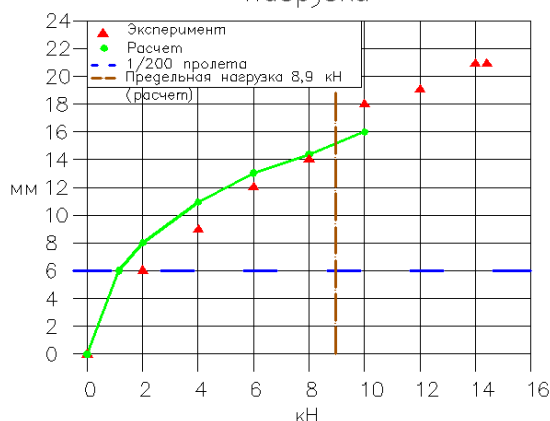


Рисунок 8. Сравнение расчетных и экспериментальных величин прогибов в зависимости от приложенной нагрузки для полки 600x1206

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о достаточной для практики точности (различие идет в запас прочности) в определении предельной нагрузки на полки по условию перехода в пластическое состояние по предложенной расчетной схеме. Также, работа послужит основой для расчета усиленных железных и железобетонных конструкций при циклическом воздействии.

Однако, добиться удовлетворительного совпадения расчетного и экспериментального значений прогибов не удалось. Расчетное значение прогиба при малой нагрузке оказывается существенно больше экспериментального (рис. 8) в диапазоне нагрузок ниже предельной, при том, что значения предельных нагрузок совпадают с достаточной точностью. Это можно объяснить тем, что в реальности происходит ужесточение конструкции на поворот вокруг ребер полки, которое приводит к снижению прогибов и в то же время не приводит к снижению предельной нагрузки, которая обуславливается местной жесткостью на изгиб в углах полки. Несовпадение прогибов также может быть обусловлено локальным изменением свойств материала по толщине в местах гибов полки. Учесть данные эффекты расчетным путем не представляется возможным в настоящее время. Поэтому рекомендуется провести испытания всех вариантов полок с целью установления зависимости прогиба от величины внешней нагрузки и назначения максимальной эксплуатационной нагрузки по критерию жесткости полки.

Прочностные характеристики легких тонкостенных конструкций, полученные в данном исследовании, показывают зависимость величины прогиба от эксцентриситета, с которым прикладываются нагрузки. Такая зависимость является значимой для расчета количества циклов нагружения конструкций до потери ими несущей способности. Также важным аспектом для расчета накопления поврежденности при циклическом нагружении стальных конструкций, представленным в этой статье, является направление распространения деформаций. В данном случае были подробно рассмотрены прогибы, образующиеся продольном и поперечном направлениях, при воздействии нагрузок. Полученные зависимости являются основой для расчета накопления усталостных повреждений не только стальных, но и бетонных, железобетонных и композитных конструкций.

3. Выводы и рекомендации

Основные результаты проделанной расчетно-экспериментальной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Величины максимальных эксплуатационных нагрузок и прогибов балок по условию прочности приведены в табл. 3 (коэфф. запаса 1,25).
2. Величины максимальных эксплуатационных нагрузок на полки по условию прочности приведены в табл. 5 (коэфф. запаса 1,25).
3. Предельные нагрузки, полученные в результате расчетов, идут с учетом запаса прочности.

С целью дополнительного уточнения полученных результатов можно рекомендовать провести:

1. Испытания полок различных типоразмеров с целью определения зависимости нагрузка-прогиб и последующего назначения величины предельной нагрузки исходя из величины допустимого прогиба.
2. Контрольные испытания балки длиной 1500 мм с целью определения зависимости нагрузка-прогиб, а также предельной нагрузки по условию прочности.
3. Испытания поведения конструкции балок длиной 1500 мм. при повторном нагружении.
4. Испытание с использованием других материалов для сравнения коэффициента погрешности расчетных и экспериментальных результатов.

Литература

- [1]. Тимошенко С.П. Об устойчивости плоской формы изгиба двутавровой балки. Известия СПб Политехнического института, т. IV—V, 1905—1906
- [2]. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов: С краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений: пер. с англ. Под ред. А.Н. Митинского. Изд. 2-е, стереотипное. М.: КомКнига, 2006. 536 с.
- [3]. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни: Прочность, устойчивость, колебания / Москва, Ленинград : Государственное издательство строительной литературы, 1940. 276 с
- [4]. Власов В.З. Кручение и устойчивость тонкостенных открытых профилей // Строительная промышленность, 1938. №6. С.49-53; № 7. С.55-60.
- [5]. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.: Гостехиздат, 1949. 784 с.

- [6]. Уманский А.А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций. М.: Оборонгиз, 1939. 112 с.
- [7]. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Госстройиздат, 1962. 476 с..
- [8]. Бычков Д.В. Расчет балочных и рамных стержневых систем из тонкостенных элементов. М. 1948. 208 с.
- [9]. Бычков Д.В., Мроцинский А.К. Кручение металлических балок. М.1944. 260 с.
- [10]. Туснин А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.23.01 /А.Р. Туснин. М. 2004. 37 с.
- [11]. Рыбаков, В.А. Современные методы расчета металлоконструкций из тонкостенных профилей, Стройметалл, № 2(2). 2007. С. 36-38.
- [12]. Рыбаков В.А. Надежность металлоконструкций из тонкостенных профилей. //Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды Междунар. Конф. СПб., 2008. С. 292-295.
- [13]. Альхименко А.И., Ватин Н.И., Рыбаков В.А. Технология легких стальных тонкостенных конструкций. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. 27 с.
- [14]. Белый Г.И. К расчету на устойчивость стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей. СПб: Вестник гражданских инженеров. 2016. №3 (56), С. 46-51.
- [15]. Волкова А.А., Пайков А.В., Столяров О.Н., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Структура и свойства текстильно-армированного бетона. СПб: Инженерно-строительный журнал. 2015. №7(59).
- [16]. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М: Изд-во Стройиздат. 2007. 184 с.
- [17]. Бондарь В.С., Даншин В.В., Семенов П.В. Численное моделирование нелинейных процессов накопления повреждений при циклическом нагружении. Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 3. С. 286-291.
- [18]. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Мележик И. И.. Оценка развития трещин при многорежимном циклическом нагружении на основе анализа рассеянных повреждений материала. Динамика и прочность машин. 2015. Т. 18, № 4/2. С. 53-58.
- [19]. Бондарь В.С., Даншин В.В., Макаров Д.А. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2014. Т. 8, № 2. С. 125-144.
- [20]. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2004 Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN. European Committee for Standardisation. 2004.
- [21]. Louise C.N., Md Othuman A.M., Ramli M. Performance of lightweight thin-walled steel sections: theoretical and mathematical considerations // Applied Science Research, 2012, №3 (5). Pp. 2847-2859
- [22]. Tenek, L., A Beam Finite Element Based on the Explicit Finite Element Method International Review of Civil Engineering (IRECE). 2015. 6 (5). Pp. 124-132.
- [23]. Keerthan P., Mahendran M. Thermal performance of load bearing cold-formed steel walls under fire conditions using Numerical studies // Journal of Constructional Steel Research, №80. 2013. Pp. 412-428.
- [24]. Sarawit A.T., Kim Y., Bakker M.M., Pekoz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448.
- [25]. O. Soegihardjo, S. Suhardjono, B. Pramujati, A. S. Pramono, Parametric Beam Modeling to Predict the First Natural Bending Frequency of Thin Wall Box-Shaped Structures Verified Using Experimental Modal Analysis, International Review of Mechanical Engineering. 2017. Т. 11, №1. Pp. 77-86.
- [26]. G. Sanyal, K. Samal, A geometry-dependent generalized shape function for calculation of stress intensity factor for axially cracked thin-walled tubes, International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE). 2014. Т. 6. № 2.
- [27]. A.Teter, Zb. Kolakowski, Coupled dynamic buckling of thin-walled composite columns with open cross-sections, Composite Structures. 2013. Т. 95. pp. 28-34.
- [28]. V. Kobelev, Thin-Walled Rods With Semiopen Profiles, Journal of Applied Mechanics, 2013. Т. 80. № 1. Pp. 100-111.
- [29]. N. L. Rizzi, V. Varano, St. Gabriele, Initial postbuckling behavior of thin-walled frames under mode interaction, Thin-Walled Structures. 2013. Т.68. Pp. 124-134.
- [30]. G. Janevski, P. Kozić, R. Pavlović. Moment lyapunov exponents and stochastic stability of a thin-walled beam subjected to eccentric axial loads. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2012. Т. 50. № 1. pp. 61-83.
- [31]. Левандовский А.Н., Мельников Б.Е., Шамкин А.А. Моделирование разрушения пористого материала // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 1(69). С. 3–22.

- [32]. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5(40). С. 86-99.
- [33]. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения. // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1(45). С. 23-40.
- [34]. Nekliudova U.E., Semenov A.S., Melnikov B.E., Semenov S.G. Experimental research and finite element analysis of elastic and strength properties of fiberglass composite material. // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3(47). Pp. 25-39.
- [35]. Vatin N.I., Nazmeeva T., Guslinsky R. Problems of cold-bentnotched c-shaped profile members // Advanced Materials Research. 2014. T. 941-944. C. 1871-1875.
- [36]. Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого с-профиля // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5. С. 44.
- [37]. Garifullin M., Vatin N., Jokinen T., Heinisuo M. Numerical solution for rotational stiffness of RHS tubular joints // Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II - Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 2016. Pp.81-86.
- [38]. Гарифуллин М.Р., Ватин Н.И. Устойчивость тонкостенного холодногнутого профиля при изгибе – краткий обзор публикаций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №6 (21). С. 32-57.
- [39]. Ватин Н.И., Синельников А.С. Холодногнутый стальной профиль в малых мостовых конструкциях // Строительство уникальных зданий и сооружений 2012. № 3 С. 39-51.
- [40]. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля // Строительство уникальных зданий и сооружений 2012. №1. С. 47-53.
- [41]. Туснин А.Р., Туснина О.А. Вычислительная система «Сталькон» для расчета и проектирования стержневых конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 62-64.
- [42]. Туснин А.Р. Особенности численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 11. С. 60-62.
- [43]. Туснин А.Р. Некоторые вопросы расчета тонкостенных стальных конструкций // Научное обозрение. 2015. № 11. С. 79-82.
- [44]. Дьяков С.Ф., Лалин В.В. Построение и анализ конечных элементов стержня открытого профиля с учетом деформаций сдвига и кручения // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 130-140.
- [45]. Лалин В.В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8. С. 69-80.
- [46]. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 27. № 1. С. 53-73.
- [47]. Подзоров А.В., Зверев В.В., Тезиков Н.Ю., Карманов И.В., Жидков К.Е. Эмитационное моделирование напряженно-деформированного состояния тонколистового профилированного элемента с двойным гафрированием // Наука и бизнес: пути развития. . 2015. № 5. С. 103-105.
- [48]. Подзоров А.В., Зверев В.В., Тезиков Н.Ю., Жидков К.Е., Карманов И.В. Редуцирование площади поперечного сечения стального профиля при центральной сжатии.// Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6 (263). С. 24-28.
- [49]. Зверев В.В., Семенов А.С. Влияние податливости болтовых соединений на деформативность фермы из тонкостенных профилей // Научный журнал строительства и архитектуры. 2008. № 2. С. 9-17.

Strength characteristics of thin-walled elements

E.L. Yakovleva ¹, I.V. Atavin ^{2*}, Y.D. Kazakova ³, I.H. Maksudov ⁴

¹⁻⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

Article info	Article history	Keywords
scientific article	Received 04.10.2017	structural mechanics;
doi: 10.18720/CUBS.63.7		light-weight steel;
		thin-walled structure;
		cold-formed profile;
		finite-element method;

ABSTRACT

The paper is addressed to evaluation of the strength characteristics of a thin walled composite profile and a shelf by the condition of strength. The uniformly distributed loading of the 1.5 m long beam with different eccentricities of the crossection is considered. The values of deflections, ultimate loads are obtained. Results of the full-scale tests will be compared with the results of calculations based on application of a specialized software.

Contact information:

- 1 +78125526303, helena47@mail.ru (Elena Yakovleva, Ph.D., Associate Professor)
- 2* +79992848463, ilya_region51@mail.ru (Ilya Atavin, Student)
- 3 +79500376742, permkim5@gmail.com (Yuliya Kazakova, B.Sc., Student)
- 4 +79104432402, mcsoodoff@gmail.com (Ilkhomjon Maksudov, Student)

References

- [1]. Timoshenko S.P. Ob ustoychivosti ploskoy formy izgiba dvutavrovoy balki. Izvestiya SPb Politehnicheskogo instituta, t. IV—V, 1905—1906
- [2]. Timoshenko S.P. Istoriya nauki o soprotivlenii materialov: S kratkimi svedeniyami iz istorii teorii uprugosti i teorii sooruzheniy: per. s angl. Pod red. A.N. Mitinskogo. Izd. 2-ye, stereotipnoye. M.: KomKniga, 2006. 536 s.
- [3]. Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni: Prochnost, ustoychivost, kolebaniya / Moskva, Leningrad : Gosudarstvennoye izdatelstvo stroitelnoy literatury, 1940. 276 c
- [4]. Vlasov V.Z. Krucheniye i ustoychivost tonkostennykh otkrytykh profiley // Stroitel'naya promyshlennost, 1938. №6. S.49-53; № 7. S.55-60.
- [5]. Vlasov V.Z. Obshchaya teoriya obolochek i yeye prilozheniya v tekhnike. M.: Gostekhizdat, 1949. 784 s.
- [6]. Umanskiy A.A. Krucheniye i izgib tonkostennykh aviakonstruktsiy. M.: Oborongiz, 1939. 112 s.
- [7]. Bychkov D.V. Stroitel'naya mekhanika sterzhnevyykh tonkostennykh konstruktsiy. M.: Gosstroyizdat, 1962. 476 c..
- [8]. Bychkov D.V. Raschet balochnykh i ramnykh sterzhnevyykh sistem iz tonkostennykh elementov. M. 1948. 208 s.
- [9]. Bychkov D.V., Mroshchinskiy A.K. Krucheniye metallicheskih balok. M.1944. 260 s.
- [10]. Tusnin A.R. Raschet i proyektirovaniye konstruktsiy iz tonko- stennykh sterzhney otkrytogo profilya: Avtoref. dis. na soisk. uchen. step. d.t.n.: Spets. 05.23.01 /A.R. Tusnin. M. 2004. 37 s.
- [11]. Rybakov, V.A. Sovremennyye metody rascheta metallokonstruktsiy iz tonkostennykh profiley, Stroymetall, № 2(2). 2007. S. 36-38.
- [12]. Rybakov V.A. Nadezhnost metallokonstruktsiy iz tonkostennykh profiley. //Nauchno-tekhnicheskiye problemy prognozirovaniya nadezhnosti i dolgovechnosti konstruktsiy i metody ikh resheniya: Trudy Mezhdunar. Konf. SPb., 2008. S. 292-295.
- [13]. 13. Alkhimenko A.I., Vatin N.I., Rybakov V.A. Tekhnologiya legkikh stalnykh tonkostennykh konstruktsiy. SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 27 s.
- [14]. Belyy G.I. K raschetu na ustoychivost sterzhnevyykh elementov konstruktsiy iz tonkostennykh kholodnogutykh profiley. Spb: Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2016. №3 (56), S. 46-51.
- [15]. Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Struktura i svoystva tekstilno-armirovannogo betona. Spb: Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2015. №7(59).
- [16]. Shilin A.A., Pshenichnyy V.A, Kartuzov D.V. Vneshneye armirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitsionnymi materialami. M: Izd-vo Stroyizdat. 2007. 184 s.
- [17]. Bondar V.S., Danshin V.V., Semenov P.V. Chislennoye modelirovaniye nelineynykh protsessov nakopleniya povrezhdeniy pri tsiklicheskom nagruzhenii. Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. 2013. T. 6, № 3. S. 286-291.
- [18]. Shulzhenko N. G., Gontarovskiy P. P., Garmash N. G., Melezhik I. I.. Otsenka razvitiya treshchin pri mnogorezhimnom tsiklicheskom nagruzhenii na osnove analiza rasseyannykh povrezhdeniy materiala. Dinamika i prochnost mashin. 2015. T. 18, № 4/2. S. 53-58.
- [19]. Bondar V.S., Danshin V.V., Makarov D.A. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy pri tsiklicheskih nagruzheniyakh. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. 2014. T. 8, № 2. S. 125-144.
- [20]. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2004 Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN. European Committee for Standardisation. 2004.
- [21]. Louise C.N., Md Othuman A.M., Ramli M. Performance of lightweight thin-walled steel sections: theoretical and mathematical considerations // Applied Science Research, 2012, №3 (5). Pp. 2847-2859
- [22]. Tenek, L., A Beam Finite Element Based on the Explicit Finite Element Method International Review of Civil Engineering (IRECE). 2015. 6 (5). Pp. 124-132.
- [23]. Keerthan P., Mahendran M. Thermal performance of load bearing cold-formed steel walls under fire conditions using Numerical studies // Journal of Constructional Steel Research, №80. 2013. Pp. 412-428.
- [24]. Sarawit A.T., Kim Y., Bakker M.M., Pekoz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448.
- [25]. O. Soegihardjo, S. Suhardjono, B. Pramujati, A. S. Pramono, Parametric Beam Modeling to Predict the First Natural Bending Frequency of Thin Wall Box-Shaped Structures Verified Using Experimental Modal Analysis, International Review of Mechanical Engineering. 2017. T. 11, №1. Pp. 77-86.
- [26]. G. Sanyal, K. Samal, A geometry-dependent generalized shape function for calculation of stress intensity factor for axially cracked thin-walled tubes, International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE). 2014. T. 6. № 2.
- [27]. A.Teter, Zb. Kolakowski, Coupled dynamic buckling of thin-walled composite columns with open cross-sections, Composite Structures. 2013. T. 95. pp. 28-34.
- [28]. V. Kobelev, Thin-Walled Rods With Semiopened Profiles, Journal of Applied Mechanics, 2013. T. 80. № 1. Pp. 100-111.
- [29]. N. L. Rizzi, V. Varano, St. Gabriele, Initial postbuckling behavior of thin-walled frames under mode interaction, Thin-Walled Structures. 2013. T.68. Pp. 124-134.

- [30]. G. Janevski, P. Kozić, R. Pavlović. Moment lyapunov exponents and stochastic stability of a thin-walled beam subjected to eccentric axial loads. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2012. T. 50. № 1. pp. 61-83.
- [31]. Levandovskiy A.N., Melnikov B.Ye., Shamkin A.A. Modelirovaniye razrusheniya poristogo materiala // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2017. № 1(69). С. 3–22.
- [32]. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom Chast 1. Modeli s uchetoм nesploshnosti soyedineniya // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2013. № 5(40). С. 86-99.
- [33]. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast 2. Modeli bez ucheta nesploshnoti soyedineniya. // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2014. № 1(45). С. 23-40.
- [34]. Nekliudova U.E., Semenov A.S., Melnikov B.E., Semenov S.G. Experimental research and finite element analysis of elastic and strength properties of fiberglass composite material. // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2014. № 3(47). Pp. 25-39.
- [35]. Vatin N.I., Nazmeeva T., Guslinsky R. Problems of cold-bentnotched c-shaped profile members // *Advanced Materials Research*. 2014. T. 941-944. S. 1871-1875.
- [36]. Nazmeyeva T.V. Nesushchaya sposobnost szhatykh stalnykh tonkostennykh elementov sploshnogo i perforirovannogo secheniya iz kholodnognutogo s-profilya // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2015. № 5. S. 44.
- [37]. Garifullin M., Vatin N., Jokinen T., Heinisuo M. Numerical solution for rotational stiffness of RHS tubular joints // *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II - Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies*. 2016. Pp.81-86.
- [38]. Garifullin M.R., Vatin N.I. Ustoychivost tonkostennogo kholodnognutogo profilya pri izgibe – kratkiy obzor publikatsiy // *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2014. №6 (21). S. 32-57.
- [39]. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. Kholodnognutyy stalnoy profil v malykh mostovykh konstruktsiyakh // *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2012. № 3 S. 39-51.
- [40]. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. Bolsheproletnyye nadzemnyye peshekhodnyye perekhody iz legkogo kholodnognutogo stalnogo profilya // *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2012. №1. S. 47-53.
- [41]. Tusnin A.R., Tusnina O.A. Vychislitel'naya sistema «Stalkon» dlya rascheta i proyektirovaniya sterzhnevyykh konstruktsiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2012. № 8. S. 62-64.
- [42]. Tusnin A.R. Osobennosti chislennogo rascheta konstruktsiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2010. № 11. S. 60-62.
- [43]. Tusnin A.R. Nekotoryye voprosy rascheta tonkostennykh stalnykh konstruktsiy // *Nauchnoye obozreniye*. 2015. № 11. S. 79-82.
- [44]. Dyakov S.F., Lalin V.V. Postroyeniye i analiz konechnykh elementov sterzhnya otkrytogo profilya s uchetoм deformatsiy sdviga i krucheniya // *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatel'nosti*. 2011. № 2. S. 130-140.
- [45]. Lalin V.V., Rybakov V.A. Konechnyye elementy dlya rascheta ograzhdayushchikh konstruktsiy iz tonkostennykh profiley // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2011. № 8. S. 69-80.
- [46]. Lalin V.V., Rybakov V.A., Morozov S.A. Issledovaniye konechnykh elementov dlya rascheta tonkostennykh sterzhnevyykh sistem // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2012. T. 27. № 1. S. 53-73.
- [47]. Podzorov A.V., Zverev V.V., Tezikov N.Yu., Karmanov I.V., Zhidkov K.Ye. Emitatsionnoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tonkolistovogo profilirovannogo elementa s dvoynym gafirovaniyem // *Nauka i biznes: puti razvitiya*. . 2015. № 5. S. 103-105.
- [48]. Podzorov A.V., Zverev V.V., Tezikov N.Yu., Zhidkov K.Ye., Karmanov I.V. Redutsirovaniye ploschadi poperechnogo secheniya stalnogo profilya pri tsentralnom szhatii.// *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2015. № 6 (263). S. 24-28.
- [49]. Zverev V.V., Semenov A.S. Vliyaniye podatlivosti boltovykh soyedineniy na deformativnost fermy iz tonkostennykh profiley // *Nauchnyy zhurnal stroitelstva i arkhitektury*. 2008. № 2. S. 9-17.

Яковлева Е.Л., Атавин И.В., Казакова Ю.Д., Максудов И.Х., Прочностные характеристики тонкостенных элементов, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №12(63). С. 125-139.

Yakovleva E.L., Atavin I.V., Kazakova Y.D., Maksudov I.H. Strength characteristics of thin-walled elements, Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 12 (63). Pp. 125-139. (rus)