

Местная потеря устойчивости стальных холодногнутых профилей в условиях поперечного изгиба

Д.А. Трубина¹, Л.А. Кононова², А.А. Кауров³, Е.Д. Пичугин⁴, Д.А. Абдулаев⁵

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Информация о статье

УДК 691.714

Аналитический обзор

История

Подана в редакцию 15 марта 2014

Оформлена 20 апреля 2014

Согласована 30 апреля 2014

Ключевые слова

тонкостенный стержень;
общая устойчивость;
местная устойчивость;
ребро жесткости;
депланация;

АННОТАЦИЯ

В большинстве инженерных методик расчета несущей способности профилей с сечением сложной формы опасность местной потери устойчивости (МПУ) практически не учитывается, а задача о МПУ стержня сводится к задаче об общей устойчивости. На стадии проектирования конструкций из тонкостенных профилей важно иметь простой аппарат для оценки несущей способности, который корректно учитывал бы возможность потери местной и общей устойчивости конструкции.

В статье рассмотрены различные методики расчета тонкостенных конструкций, и представлены результаты расчета в ПК SCAD на общую и местную устойчивость. Поставлена задача определить зависимость МПУ от различных параметров сечения и выявить степень влияния на МПУ промежуточных усилителей стенки, а так же проанализировать разницу между запасом общей и местной устойчивости системы.

Содержание

1.	Введение. Актуальность	110
2.	Обзор литературы	110
3.	Общие сведения о тонкостенных стержнях и методы расчета местной устойчивости	112
4.	Сравнение коэффициента запаса местной устойчивости для различных образцов	115
5.	Выводы	116

¹ Контактный автор:

+7 (950) 002 7246, d.trubina@inbox.ru (Трубина Дарья Алексеевна, студент)

² +7 (950) 221 7012, lidia.5683@rambler.ru (Кононова Лидия Александровна, студент)

³ +7 (921) 381 8968, senya.kaurov@gmail.com (Кауров Арсений Андреевич, студент)

⁴ +7 (951) 689 6453, pichugin_egor93@mail.ru (Пичугин Егор Дмитриевич, студент)

⁵ +7 (906) 251 3209, Jamaldag@yandex.ru (Абдулаев Джамал Амирович, студент)

1. Введение. Актуальность

В настоящее время в мировой практике широкое распространение приобрели стержневые конструкции из оцинкованных тонкостенных холодногнутых профилей, полученные методом холодного формообразования на профилегибочных станках из прокатного листового металла. Однако применение легких тонкостенных стальных конструкций (ЛСТК) в России сдерживается отсутствием соответствующей нормативной базы, которая без проведения научных исследований особенностей их работы не может быть создана. Вопрос разработки и постоянного совершенствования нормативно-методологической базы проектирования ЛСТК является важнейшим шагом на пути развития этого сегмента металлостроительной индустрии на территории Российской Федерации.

Новые высокотехнологичные конструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката находят успешное применение при строительстве малонагруженных зданий и сооружений комплектной поставки, в объектах социального и бытового назначения, при реконструкции жилых зданий [1]. Но любая новая технология должна иметь под собой проверенную, адаптированную, научно-техническую основу. К сожалению, нет нормативов, где бы четко прописывались условия применений этих конструкций, методика расчета, инструкции по монтажу и эксплуатации. Несмотря на это, практика применения ЛСТК в строительстве на территории РФ широко развита. Фирмы на свой страх и риск продолжают строить, выпускать объекты, но не всегда это заканчивается хорошо. Так, в феврале 2013 года, в Новгороде обрушились балконы нового дома для семей ветеранов Великой Отечественной войны (рисунок 1, [2]). Несущий каркас балконов был выполнен из ЛСТК, но проектировщики при расчете не учли эффект депланации сечения тонкостенного профиля [2].



Рисунок 1. Обрушение балконов в доме ветеранов, Новгород, 2013 (стадия капитального ремонта)

В отличие от стальных конструкций, где установлены геометрические соотношения параметров сечения их стержневых элементов, заведомо обеспечивающие местную устойчивость, в элементах ЛСТК потеря местной устойчивости допускается на ранних стадиях нагружения. Необходимость учета этого фактора не позволяет применять для их расчетов существующие отечественные нормативные документы.

Поэтому в настоящее время одним из актуальных направлений исследования является изучение влияния потери местной устойчивости стержневых тонкостенных холодногнутых профилей.

2. Обзор литературы

Первые попытки решения задачи об изгибе стержней были произведены в XV веке Леонардо да Винчи (1452-1519), исследовавшего данное явление и предположившего, что прочность балок, опертых обоими концами, изменяется в обратном отношении к длине и в прямом отношении к ширине. В дальнейшем, на протяжении XVI-XIX веков теорией изгиба стержней занимались многие знаменитые ученые, однако все они исследовали стержни, толщина стенок или контура которых сопоставима с размерами поперечного сечения, т.е. не являющиеся тонкостенными [1].

В создание и развитие теории и методов расчета тонкостенных пространственных конструкций внесли существенный вклад Биргер И.А., Болотин В.В., Вайнберг Д.В., Власов В.З., Вольмир А.С., Гольденвейзер А.Л., Григолюк Э.И., Колтунов М.А., Корнишин М.С., Корнев Б.Г. и другие ученые. Одним из основоположников теории устойчивости тонкостенных стержней был Тимошенко С.П. С развитием вычислительной техники наиболее универсальным и эффективным методом расчета конструкций стал метод конечных элементов (МКЭ).

Власов В.З. в [3-6] решил задачу об устойчивости тонкостенного стержня с максимальной полнотой: отчетливо дана расчётная модель стержня, в формуле для нормального напряжения, помимо трёх обычных членов, фигурирует член, определяемый по закону секториальной площади. Построенная теория позволила дать более точное решение задачи об изгибно-крутильной форме потери устойчивости и колебаниях тонкостенных упругих стержней, а также развить методы расчета стержней с упругими и жёсткими связями и методы расчёта стержней при поперечных нагрузках.

Гурвиц Г.А. в [7] установил достаточную надежность методики КЭ путем решения контрольных примеров пластин и пластинчатых систем с различными условиями закрепления и нагружения и сравнением этих решений с результатами, имеющимися в литературе. Провел исследование напряженно-деформированного состояния, изучение закритической стадии работы и определение несущей способности ряда конструкций с учетом геометрической и физической нелинейностей.

Астаховым И.В. в [8] разработаны алгоритм и программа расчета на пространственную устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей открытого моносимметричного сечения, а так же разработана инженерная методика расчета на пространственную устойчивость, обеспечивающая внедрение результатов расчета в форме, принятой в СП 53-102-2004. Даны практические рекомендации для применения профилей с неэффективными зонами (зонами потери местной устойчивости). Установлено, что на пространственную устойчивость влияет не только величина, но и расположение неэффективных зон по сечению. Так, при их незначительной величине (5 %), но расположении в местах максимальных напряжений, снижение несущей способности стержня может достигать 30 % [5]. Но следует отметить, что использование двух различных теорий (открытого и замкнутого профилей) является крайне неудобным с точки зрения унификации расчетов систем тонкостенных конструкций.

Рыбаков В.А. в [9-19] рационализировал алгоритм расчета стальных тонкостенных поперечноизгибаемых просечно-перфорированных элементов на базе существующих теорий и методик. Проанализировал влияние перфорации на геометрические характеристики поперечного сечения всего сортамента профилей, влияние деформации на несущую способность тонкостенного профиля как такового с учетом влияния стесненного кручения, но без учета влияния просечек, влияния перфорации стенки на несущую способность термопрофиля, находящегося в условиях стесненного кручения и деформации. Наиболее существенные научные результаты, полученные Рыбаковым В.А. в [2] - это комплексный анализ несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок без перфорации при различных видах загрузки. На основании проведенного анализа предложен алгоритм расчета подобных элементов.

Актуальность использования ЛСТК за рубежом подтверждается описанием исследований и испытаний, связанных с этой темой. Так, например, в статье [20-25] затронули вопрос строительства в сейсмически опасных районах. Предложив использовать лёгкие стальные конструкции, автор провёл ряд исследований, где подверг укреплённую лёгким стальным каркасом стенку горизонтальным колебаниям. В результате оказалось, что подобная конструкция не теряет устойчивости даже в самом неблагоприятном, сейсмически опасном районе (в исследовании использовались показатели островов Новой Зеландии).

В статье о тепловых характеристиках несущих гнутых стальных профилей в условиях пожара [26-29] были произведены испытания, где конструкции из лёгких стальных конструкций с навесными плитами из гипсокартона и слоем минеральной ваты проверялась на действие больших термических нагрузок (пожара). Эти испытания показали, что такая конструкция не теряет устойчивость.

В статье, посвященной эффективности легких стальных тонкостенных конструкций [30-34], делается акцент на преимуществах ЛСТК по сравнению с деревянными конструкциями: высокая прочность, стойкость к биологическим повреждениям, маленький вес и пр. К недостаткам автор относит отсутствие материалов по расчёту местной потери устойчивости, которая является одним из важных моментов при расчете тонкостенных конструкций.

3. Общие сведения о тонкостенных стержнях и методы расчета местной устойчивости

С целью снижения расхода металла в строительных конструкциях применяют наиболее эффективные типы стержневых элементов, поперечные сечения которых назначают из принципа рационального распределения материала. Дополнительный экономический эффект от применения таких профилей достигается за счет отказа от использования грузоподъемной техники при возведении зданий и сооружений [35-41].

В строительной технике тонкостенным стержнем называется брус призматической или цилиндрической формы, у которого все три измерения выражаются величинами разных порядков: $t \ll b$; $b \ll l$. Тонкостенные стержни бывают неперфорированные (рисунок 2,а) и перфорированные (термопрофиль) (рисунок 2,б).

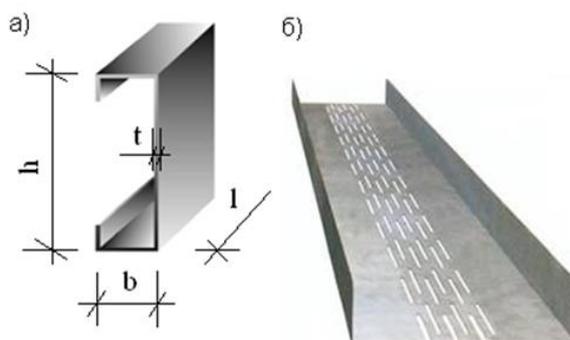


Рисунок 2.

а) неперфорированный тонкостенный профиль;
б) перфорированный тонкостенный профиль

В тонкостенных стержнях, преимущественно небольшой гибкости, стенка или полка теряют устойчивость раньше, чем в стержне в целом. **Местной потерей устойчивости** называется потеря устойчивости каким-либо элементом сечения стержня и выход его из работы, при котором происходит резкое ослабление стержня, делающее оставшуюся часть сечения несимметричной.

Для определения несущей способности тонкостенных стержней в последнее время был предложен «Метод прямого определения несущей способности» [42]. В основе метода лежит отыскание критических нагрузений для трёх форм потери устойчивости в упругой стадии (общей, локальной и в форме искажения сечения). При этом в расчет вводится полная площадь поперечного сечения стержня. Одновременно учитывается взаимодействие элементов сечения профиля, как единого стержня. Критические усилия трех форм потери устойчивости в упругой стадии работы предлагается определять в прикладном пакете CUFSM методом конечных полос. Наряду с численным автоматизированным методом Шафер Б. предлагает «ручной» способ расчета по формулам. Следует заметить, что структура формул «ручного» счета построена в большинстве случаев по результатам расчетов методом конечных полос.

Метод конечных полос является вариантов метода конечных элементов. В нем дискретизируют поперечное сечение профиля на продольные полосы, тогда как по его длине дискретизация не предусмотрена. Далее рассматривают работу стержня в упругой стадии. Кроме того, соответствие напряженно-деформированного состояния стержня истинному зависит от рационального выбора интерполирующих функций для перемещений в продольном направлении [43-51].

Западноевропейскими учеными предложен другой подход к построению расчетной схемы тонкостенного стержня. Элементы металлических конструкций в виде холодногнутых тонкостенных профилей состоят из пластинчатых элементов. Пластинки, составляющие стержень, могут терять местную (локальную) устойчивость и вызвать внезапное разрушение (изгиб, кручение) в целом. Поэтому в качестве расчетной схемы тонкостенного стержня предлагается замена сечения совокупностью пластинок с различными условиями опирания по контуру (рисунок 3, [57]) [52-57].

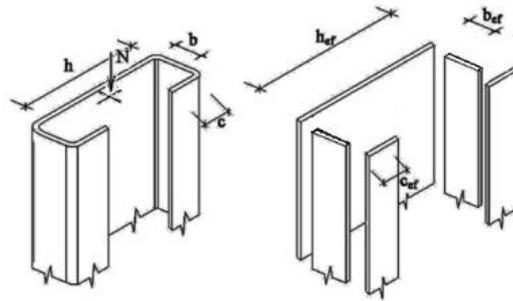


Рисунок 3. Замена сечения для расчетной схемы

В Еврокоде 3 [57] представлена своя методика расчета устойчивости. Основные этапы этого расчета учитывают:

1. Свойства поперечного сечения: влияние радиуса скругления.

Особенность холодногнутой профилей - присутствие закругленных углов. Еврокод 3 учитывает скругление путем оценки теоретической длины b_p каждого прямого участка относительно смежных угловых элементов (рисунок 4, [57]).

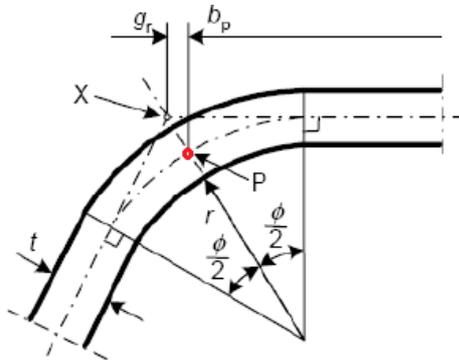


Рисунок 4. Точка P для определения теоретической длины b_p относительно смежного угла

2. Свойства материалов: определение осредненного предела текучести

Специфичная проблема холодногнутой профилей состоит в том, что предел текучести стали может локально увеличиваться в процессе холодного деформирования. Еврокод 3 регламентирует применение осредненного предела текучести. В Еврокоде обозначены пределы текучести и прочности наиболее широко применяемых сталей.

3. Геометрические пропорции

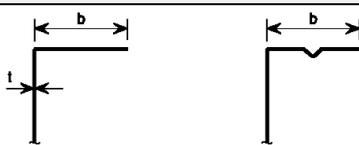
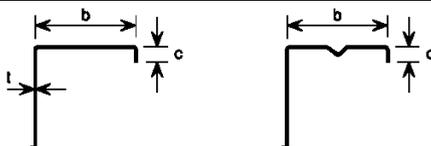
Чтобы обеспечить достаточную жесткость элемента и избежать потери устойчивости отгибов непосредственно, размеры отгибов должны быть в пределах следующих диапазонов (см. таблицу 1) [57]:

$$0,2 \leq c / b \leq 0,6$$

$$0,1 \leq d / b \leq 0,3$$

Если $c / b < 0,2$ или $d / b < 0,1$ отгибы должны быть проигнорированы ($c = 0$ or $d = 0$)

Таблица 1. Максимальные значения отношения ширины к толщине для элементов с отгибами

Часть поперечного сечения	Максимальное значение
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$

Местная потеря устойчивости в Еврокоде 3 учитывается методом «уменьшенной ширины». Для поперечного сечения сжатого элемента расчетом должен быть учтен эффект местной потери устойчивости путем замены неоднородного распределения напряжения на однородное распределение максимального напряжения, действующего на уменьшенную часть элемента. При той же толщине t , но при уменьшенной ширине (рисунок 5).



Рисунок 5. Метод «уменьшенной ширины»

Потеря местной устойчивости стенок профиля может произойти при любой нагрузке на стержень, если эта нагрузка вызовет в сечении стержня возникновение нормальных сжимающих и касательных напряжений в отдельности или вместе [58-59].

Продольный изгиб стержней из тонкостенного профиля отличается от продольного изгиба призматических стержней (например, прямоугольного сечения) тем, что нужно учитывать влияние кручения и местную устойчивость стенок, которые чаще всего имеют контуры пластинок [60-68]. Эти два фактора делают невозможным излишнее уменьшение толщины стенок. Наибольшее влияние кручения и возможность потери местной устойчивости проявляются при осевом сжатии стержней. Зато при внецентренной нагрузке и изгибе влияние кручения на общую устойчивость выявляется только в длинных стержнях [69-71]. Потеря местной устойчивости в этих стержнях может проявляться в пролете, но при установке промежуточных усилителей стенки это явление можно свести к минимуму, выбрав такое расположение усилителей, при котором прежде произойдет потеря общей устойчивости.

4. Сравнение коэффициента запаса местной устойчивости для различных образцов

Нами были проанализированы несущая способность и запас общей и местной устойчивости в SCAD Office [72-81] для образцов однопролетной двух- и трехсекционной с-образной балки (рисунок 5, 6). Такие балки являются фрагментами типовых конструктивных решений ЛСТК межэтажного перекрытия.

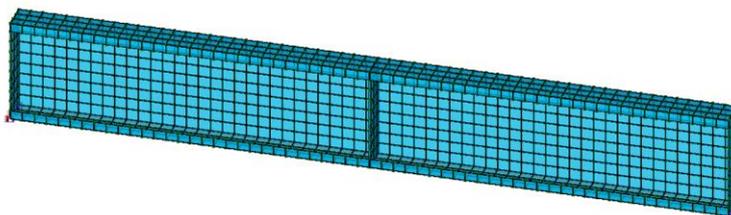


Рисунок 5. Расчетная схема двухпролетной С-образной балки в ПК SCAD

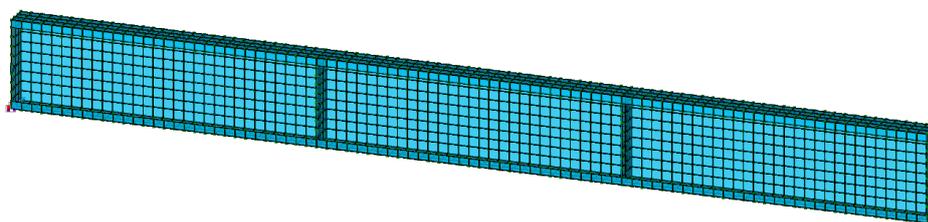


Рисунок 6. Расчетная схема трехпролетной С-образной балки в ПК SCAD

К выбранному профилю ПС-150-1,0 была приложена единичная нагрузка, в виде распределенной нагрузки по фиктивным балкам, добавленным в плоскости верхней полки над усилителями стенки. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Коэффициенты запаса устойчивости и местной устойчивости

Профиль	Длина образца, м	Количество усилителей стенки, шт	Кз устойчивости системы	Наим Кз местной устойчивости
ПС-150-1,0	1,2	1	0,65	58,5
ПС-150-1,0	1,8	2	0,62	61,3
ПС-150-1,0	1,8	1	0,53	50,2
ПС-150-1,0	2,7	2	0,56	52,8
ПС-150-1,0	2,4	1	0,47	45,1
ПС-150-1,0	3,6	2	0,49	48,6
ПС-150-1,0	3,0	1	0,36	30,3
ПС-150-1,0	4,5	2	0,39	32,4

Проведенный расчет позволил оценить степень влияния ребер жесткости при расчете на местную потерю устойчивости:

- наименьший коэффициент запаса местной устойчивости при увеличении расстояния между усилителями стенки убывает стремительней, чем общий коэффициент запаса устойчивости
- в расчетной схеме с двумя усилителями стенки, коэффициенты запаса общей и местной устойчивости в среднем на 10% больше, чем в аналогичных схемах с такой же длиной секции, но при одном усилителе стенки.

Для уточнения результатов необходимо проводить практические испытания, чтобы увидеть насколько действительная (опытная) несущая способность сжато-изогнутых стержней отличается от полученной по приближенным схемам и методу конечных элементов несущей способности [82-85].

5. Выводы

Расчёт лёгких стальных конструкций, который позволял бы учитывать все характерные особенности тонкостенных профилей, является злободневным вопросом, как в России, так и за рубежом. У таких видов конструкций есть ряд неоспоримых преимуществ, основными из которых является низкая стоимость, малый вес, удобство монтажа. Но для полноценного использования тонкостенных профилей необходимо дорабатывать методики в сторону унификации расчёта [86-94].

По результатам проведенного аналитического обзора, можно сделать следующие выводы:

1. Проверка устойчивости исследуемых элементов стальных конструкций показала, что несущая способность и сопротивление устойчивости элементов обеспечивается с разным запасом для общей и местной устойчивости;

2. Наблюдается нелинейная зависимость между длиной секции/количеством секций и коэффициентами запаса общей и местной устойчивости.

3. Наименьший коэффициент запаса местной устойчивости у рассчитываемых образцов находился в элементах, находящимся в плоскости приложения нагрузки.

Разработанная модель позволяет проводить дальнейшие исследования в области расчета и проектирования легких тонкостенных конструкций, анализировать влияние величины коэффициентов запаса устойчивости на несущую способность всей конструкции.

Литература

1. Рыбаков В. А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. 207 с.
2. Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Экспертное заключение проектного решения по устройству балкона выполненного ЗАО «И.И.С» в 2011г. СПб, 2013. 16 с.
3. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни (прочность, устойчивость, колебания) М.: Стройиздат, 1940. 276 с.
4. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 574 с.
5. Власов В. З. Избранные труды Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 507 с.
6. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. - М.: Физматгиз, 1959. 574 с.
7. Гурвиц Г. А. Изгиб и устойчивость нелинейно-деформируемых пластинчатых систем. М., 1985. 136 с.
8. Астахов И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей. СПб., 2006. 123 с.
9. Рыбаков В. А. Методы решения научно-технических задач в строительстве. Численные методы расчета тонкостенных стержней: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. 166 с.
10. Рыбаков В. А., Гамаюнова О. С. Напряженно-деформированное состояние элементов каркасных сооружений из тонкостенных стержней // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 7 (12). С. 79-123.
11. Рыбаков В. А. Применение полусдвиговой теории В.И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней: автореф. дисс. канд. тех. наук: 01.02.04. СПб, 2012. 184 с.
12. Лалин В. В., Рыбаков В. А., Морозов С. А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1 (27). С. 53-73.
13. Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // Стройпрофиль. 2007. № 2. С. 60.
14. Рыбаков В. А., Коломийцев Д. Е., Родичева А. О. Огнестойкость междуэтажного перекрытия на основе стальных с-образных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8. С. 32-37.
15. Рыбаков В. А., Недвига П. Н. Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 8. С. 27-30.
16. Рыбаков В. А., Гамаюнова О. С. Влияние перфорации стенки на несущую способность термопрофилей // Стройпрофиль. 2008. № 1. С. 128.
17. Лалин В. В., Рыбаков В. А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8. С. 69-80.
18. Альхименко А. И., Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Технология легких стальных тонкостенных конструкций. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. 27 с.
19. Hicks S., Davies C. Light Steel-framed house gets the earthquake test. Build. October/November 2009. Pp. 54-55.
20. Жмарин Е. Н., Рыбаков В. А. ЛСТК – инструмент для реализации программы «Доступное и комфортное жилье» // Журнал «СтройПРОФИЛЬ». 2007. № 7(61). С. 166-167.
21. Keerthan P., Mahendran M. Thermal performance of load bearing cold-formed steel walls under fire conditions using Numerical studies. Journal of Constructional Steel Research. 2013. №80. Pp. 412-428.
22. 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
23. Dubina D., Ungureanu V., Szabo I. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members. Proceedings of the 3rd ICTWS, 2001. Pp. 179-186.

24. Koiter, W. T. The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load. Rep. № 5287. National Luchtvaart Laboratorium. 2012. Pp. 365-374.
25. The finite element method for thin-walled members-applications / Sarawit A. T., Kim Y., Bakker M. C M., Pekoz T. // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448.
26. Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section / Mamalis A. G., Manolakos D. E., Ioannidis M.B., Kostazos P.K., Dimitriou C. // Thin-Walled Structures. 2003. Vol. 41. Issue 10. Pp. 891-900.
27. Rasmussen J. R. Kim. Bifurcation of locally buckled point symmetric columns - Experimental investigations // Thin-Walled Structures. 2006. Vol. 44. Issue 11. Pp. 1175-1184.
28. Chen Ju, Young B. Cold-formed steel lipped channel columns at elevated temperatures // Engineering Structures. 2007. Vol. 29. Issue 10. Pp. 1161-1174.
29. Silvestre N., Young B., Camotima D. Non-linear behaviour and load-carrying capacity of CFRP-strengthened lipped channel steel columns. Engineering Structures. 2008. Vol. 30. Issue 10. Pp. 2613-2630.
30. Rogers C. A., Yang D., Hancock G. J. Stability and ductility of thin high strength G550 steel members and connections // Thin-Walled Structures. 2003. Vol. 41. Issues 2-3. Pp. 149-166.
31. The direct strength method for stainless steel compression members / Becque J., Lecce M., Rasmussen J., Kim R. // Journal of Constructional Steel Research. 2008. Vol. 64. Issue 11. Pp. 1231-1238.
32. Зверев В. В. Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: Исследование, проектирование, изготовление. Липецк, 2000. 395 с.
33. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. 63 с.
34. Орлова А. В., Жмарин Е. Н., Парамонов К. О. Энергетическая эффективность домов из ЛСТК // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 6 (11). С. 1-13.
35. Айрумян Э. Л., Галстян В. Г. Исследование действительной работы тонкостенных холодногнутых прогонов из оцинкованной стали // Промышленное и гражд. стр-во. 2002. № 6. С. 31-34.
36. Айрумян Э. Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутого стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балтпрофиль». М.: ЦНИИПСК им. Мельникова. 2004. 64 с.
37. Айрумян Э. Л., Каменщиков Н. И. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения // Мир строительства и недвижимости. 2006. №36. С.9-11.
38. Легкие стальные каркасы из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий массового применения / Айрумян Э. Л., Беляев В. Ф., Каганов А. А., Румянцева И. А. // Промышленное и гражданское строительство. 2003.. № 6. С. 23-24.
39. Airumyan E. L., Voiko O. I., Kamynin S. V. Effective use of cold-formed steel structures for low-story urban buildings. Improvement of Buildings' Structural Quality by New Technologies // Proceedings of the Final Conference of COST Action C12. 2005. Pp. 431-437.
40. Павлов А. Б., Айрумян Э. Л., Камынин С. В., Каменщиков Н. И. Быстровозводимые малоэтажные здания с применением легких стальных тонкостенных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 9. С. 51-53.
41. Белый Г. И. , Э. Л. Айрумян Исследования работы стальной фермы из холодногнутого профилей с учётом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство 2010. № 5 С. 35-38.
42. Туснин А. Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. М: Издательство АСВ, 2009. 144 с.
43. Колесов А. И., Ямбаев И. А., Морозов Д. А. О резервах несущей способности сжато-изогнутых стержней // Электронный журнал. Предотвращение аварий зданий и сооружений, 2010. 12 с.
44. Нехаев Г. А. Легкие металлические конструкции. Тула: Изд ООО «ПроФСтальПрокат», 2012. 90 с.
45. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. СПб.: Изд-во Наука, 1979, 450 с.

46. Жмарин Е. Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №2. С. 27-30.
47. Ватин Н. И., Жмарин Е. Н., Куражова В. Г., Усанова К. Ю. Конструирование зданий и сооружений. Легкие стальные тонкостенные конструкции: учеб. Руководство. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 266 с.
48. Белый Г. И. Особенности работы стержневых элементов конструкций из оцинкованных гнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3. С. 99-103.
49. Белый Г. И. К расчету на устойчивость стержневых элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 44-48.
50. Белый А. Г. Деформационный расчет и устойчивость тонкостенных призматических стержней произвольного профиля сжатых с двухосным эксцентриситетом / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н., Спец.: 05.23.17. СПб, 2000. 114 с.
51. Шишкин В. М. Разработка эффективных методов расчета тонкостенных конструкций с учетом пластических и демпфирующих свойств материала / дисс. на соиск. учен. степ. д.т.н. Спец.: 05.13.18. Казань, 2008. 414 с.
52. Чернов С. А., Дьяков И. Ф. К расчету пространственной тонкостенной стержневой системы // Автоматизация и современные технологии: ежемесячный межотраслевой научно-технический журнал. 2008. №2. С. 3-6.
53. Тугаев А. С. Устойчивость пластин и тонкостенных стержней / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.: 01.02.03. М, 2007. 151 с.
54. Тимошенко С. П. Об устойчивости упругих систем. К.: Изд-во Киевского политехнического института. 1910. 182 с.
55. Тананайко О. Д., Шварц М. А. Смешанный метод расчета стержневых систем на прочность, колебания и устойчивость // Труды ЛИИЖТ. СПб.: Изд-во СПбГУПС, 1976. С. 23-28.
56. 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.
57. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81
58. Белов И. Д., Юрченко В. В. Про проверку устойчивости центрально-сжатых стержней из одиночных тонкостенных холодногнутох профилей открытого сечения // Металлические конструкции. 2010. Т. 16. № 4. С. 239-250.
59. Смазнов Д. Н. Конечно-элементное моделирование работы жестких вставок тонкостенных холодноформованных стальных профилей // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 67. С. 101-113.
60. Смазнов Д. Н. Конечно-элементное моделирование стоек замкнутого сечения холодногнутох профилей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 123. С. 334-337.
61. Шатов Д. С. Конечно-элементное моделирование перфорированных стоек открытого сечения из холодногнутох профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3. С. 32-35.
62. Дьяков С. Ф., Лалин В. В. Построение и анализ конечных элементов тонкостенного стержня открытого профиля с учетом деформаций сдвига при кручении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2011. № 2. С. 130-140.
63. Дьяков С. Ф. Сравнительный анализ задачи кручения тонкостенного стержня по моделям Власова и Сливкера // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. № 1 (1). С. 24-31.
64. Назмеева Т. В. Обеспечение пространственной жесткости покрытия в зданиях из ЛСТК // Инженерно-строительный журнал. 2009. №6. С. 12-15.
65. Марченко Т. В., Банников Д. О. Сопоставительный анализ форм потери устойчивости тонкостенных стержневых элементов // Металлические конструкции. 2009. Т. 15. № 3. С. 177-188.
66. Ульшин А. Н. Обобщенный показатель качества стальных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 62-70.
67. Каталонская М. А. ЛСТК – быстрое решение для строительства доступного жилья // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. №10. С.75-75.

68. Гусева Т. П. Инновационные технологии для жилищного строительства // Жилищное строительство. 2009. № 4. С. 4-6.
69. Субботин С. Л. Изгиб и кручение тонкостенных стержней при температурных воздействиях. Калинин, 1984. 185 с.
70. Тамбовцева М. Е. Современное состояние и проблемы инновации в индивидуальном строительстве // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2011. № 2. С. 7.
71. Перельмутер А. В., Юрченко В. В. О расчете пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6. С. 18-25.
72. Перельмутер А. В., Сливкер В. И., Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 388 с.
73. Перельмутер А. В., Сливкер, В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2002. 618 с.
74. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. SCAD OFFICE. Формирование сечений и расчет их геометрических характеристик. М.: Изд-во АСВ, 2004. 80с.
75. Юрченко В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутох профилей в среде «SCAD Office» // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8. С. 38-46.
76. Гордеева А. О., Ватин Н. И. Расчетная конечно-элементная модель холодногнутого перфорированного тонкостенного стержня в программно-вычислительном комплексе SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3. С. 36-46.
77. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. Вычислительный комплекс SCAD. М.: Изд-во АСВ, 2007. 592 с.
78. Кузьмин Н. А., Лукаш П. А., Милейковский И. Е. Расчет конструкций из тонкостенных стержней и оболочек. М.: Изд-во Госстройиздат, 1960. 264 с.
79. Осокин А. В. Развитие метода конечных элементов для расчета систем, включающих тонкостенные стержни открытого профиля / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.: 05.23.17. М., 2010. 134 с.
80. Косых Э. Г. Поперечный изгиб тонкостенного стержня с переменной по длине жесткостью. Минск : Изд-во центр БГУ, 2013. 3 с.
81. Уманский А. А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций. М.:Изд-во Оборонгиз, 1939. 112 с.
82. Малинин М. Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния пространственных тонкостенных конструкций сложной геометрии методом конечных элементов / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.:01.02.04. Брежнев, 1984. 153 с.
83. Каменских И. В. Математическое и численное моделирование задач устойчивости тонкостенных конструкций методом модуль-элементов / дисс. на соиск. учен. степ. д.ф-м. н. Спец: 05.13.18. Комсомольск-на-Амуре, 2004. 210 с.
84. Воробьев Л. Н. Деформационный расчет и устойчивость тонкостенных стержней открытого профиля // Труды Новочеркасского политехнического института. Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ(НПИ), 1958. Том 69/83. С.3-48.
85. Ветюков Ю. М., Елисеев В. В. Упругие деформации и устойчивость равновесия тонкостенных стержней открытого профиля // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2007. № 52-1. С. 49-53.
86. Бычков Д. В. Расчет балочных и рамных стержневых систем из тонкостенных элементов. М.: Изд-во Стройиздат, 1948. 208 с.
87. Брудка Я., Лубиньски М. Легкие стальные конструкции. Изд. 2-е, доп, Пер. с польск. / Под ред. С. С. Кармилова. М., Стройиздат, 1974. 342с.
88. Анучкин А. П. Изыскание оптимальных форм балок и колонн из тонкостенных штампованных профилей / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.: 05.23.01. М., 1949. 169 с.
89. Александров В. Г. Расчет тонкостенных неразрезных балок на совместное действие изгиба и кручения при подвижной нагрузке / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.: 05.23.01. Ростов н/Д, 1948. 130 с.
90. Белоусов В.П. Исследование устойчивости стержней при продольном и поперечном нагружении / дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.: 01.02.03. Джалбул, 1983. 215 с.

91. Дьяков С.Ф., Лалин В.В. Дисперсия крутильной волны, распространяющаяся в тонкостенном стержне // Интернет-журнал «Науковедение», 2013. № 5 (18). 10 с.
92. Дьяков С. Ф., Лалин В. В. Построение и анализ конечного элемента тонкостенного стержня с учетом деформаций сдвига для решения задач динамики // Интернет-журнал «Науковедение», 2013. № 5 (18) 10 с.
93. Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 44–51
94. Назмеева Т.В. Обеспечение пространственной жесткости покрытия в зданиях из ЛСТК // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6(8). С. 12-15.

Local buckling of steel cold-formed profiles under transverse bending

D.A. Trubina¹, L.A. Kononova², A.A. Kaurov³, Y.D. Pichugin⁴, D.A. Abdulaev⁵

Saint-Petersburg State Polytechnical University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia.

ARTICLE INFO

Analytical review

Article history

Received 15 March 2014
Received in revised form 20 April 2014
Accepted 30 April 2014

Keywords

thin-wall bar;
general stability;
local stability;
rib;
warping;

ABSTRACT

Danger local buckling (LPA) are virtually ignored in most engineering methods for calculating the cross-section profiles with complex shapes. The problem of LPA rod is reduced to the problem of overall sustainability. At the stage of design of thin-walled sections structures, it is important to have a simple device for assessing the carrying capacity of a particular size. The article discusses the different methods of calculation of thin-walled structures, and the calculation results in a PC SCAD on general and local resistance. It was tasked to determine the dependence of LPA on various parameters section and the degree of influence on the LPA repeaters wall, to analyze the difference between the reserve general and local stability of the system.

¹ Corresponding author:
+7 (950) 002 7246, d.trubina@inbox.ru (Darya Alekseevna Trubina, Student)
² +7 (950) 221 7012, lidia.5683@rambler.ru (Lidia Aleksandrovna Kononova, Student)
³ +7 (921) 381 8968, senya.kaurov@gmail.com (Arsenij Andreevich Kaurov, Student)
⁴ +7 (951) 689 6453, pichugin_egor93@mail.ru (Egor Dmitrievich Pichugin, Student)
⁴ +7 (906) 251 3209, Jamaldag@yandex.ru (Jamal Amirovich Abdulaev, Student)

References

1. Rybakov V. A. *Osnovy stroitel'noy mekhaniki legkikh stalnykh tonkostennykh konstruksiy*. [Fundamentals of structural mechanics, light steel thin-walled structures] SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2011. 207 p.(rus)
2. Vatin N. I., Rybakov V. A. *Ekspertnoye zaklyucheniye proyekt'nogo resheniya po ustroystvu balkona vypolnennogo ZAO «I.I.S» v 2011g.* [Expert opinion on the device design decision made balcony] SPb, 2013.16 p. (rus)
3. Vlasov V. Z. *Tonkostennyye uprugiyе sterzhni (prochnost, ustoychivost, kolebaniya)* [Thin-walled elastic rods] M.:Stroyizdat, 1940. 276 p.(rus)
4. Vlasov V. Z. *Tonkostennyye uprugiyе sterzhni*. [Thin-walled elastic rods] M.: Fizmatgiz, 1959. 574 p.(rus)
5. Vlasov V. Z. *Izbrannyye trudy* T. 2. [Selected Works] M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. 507 p.(rus)
6. Vlasov V. Z. *Tonkostennyye uprugiyе sterzhn*. [Thin elastic rods] M.: Fizmatgiz, 1959. 574 p.(rus)
7. Gurvits G. A. *Izhib i ustoychivost nelineynо-deformiruyemykh plastinchatykh sistem*. [Bending and Stability of nonlinear deformable plate systems] M., 1985. 136 p.(rus)
8. Astakhov I. V. *Prostranstvennaya ustoychivost elementov konstruksiy iz kholodnognutyykh profiley*. [Spatial stability of structural elements of cold-formed profiles] SPb., 2006. 123 p.(rus)
9. Rybakov V. A., *Metody resheniya nauchno-tekhnicheskikh zadach v stroitel'stve. Chislennyye metody rascheta tonkostennykh sterzhney: uchebnoye posobiye*. [Methods for solving scientific and technical problems in construction. Numerical methods for calculating thin rods] Spb.: Izd-vo SpbGPU, 2013. 166 s.(rus)
10. Rybakov V. A., Gamayunova O. S. The stress-strain state of frame constructions' elements from thin-walled cores // Construction of Unique Buildings and Structures. 2013. № 7 (12). Pp. 79-123. (rus)
11. Rybakov V. A. *Primeneniye polusdvigovoy teorii V.I. Slivkera dlya analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem tonkostennykh sterzhney: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 01.02.04*. [Application polusdvigovoy theory VI Slivkera for analysis of stress-strain state of thin-walled systems: Author. diss. Candidate. those. Sciences: 01.02.04.] SPb, 2012. — 184 p.(rus)
12. Lalin V. V., Rybakov V. A., Morozov S. A. The Finite elements research for calculations of thin-walled bar systems // Magazine of Civil Engineering. 2012. № 1 (27). Pp. 53-73.(rus)
13. Vatin N. I., Rybakov V. A. *Raschet metallokonstruksiy: sedmaya stepen svobody* [Calculation of metal: the seventh degree of freedom] // *Stroyprofil*. 2007. № 2. Pp. 60-64.(rus)
14. Rybakov V. A., Kolomyitsev D. Ye., Rodicheva A. O. Fire resistance based on the intermediate floor with steel-profiles // Magazine of Civil Engineering. 2010. № 8. Pp. 32-37.(rus)
15. Rybakov V. A., Nedviga P. N. Empirical methods for estimating the bearing capacity of steel thin-walled expanded perforated beams and beams with a solid wall // Magazine of Civil Engineering. 2009. № 8. Pp. 27-30. (rus)
16. Rybakov V. A., Gamayunova O. S. *Vliyaniye perforatsii stenki na nesushchuyu sposobnost termoprofiley* [Influence of wall perforation on the bearing capacity thermoprofiles] // *Stroyprofil*. 2008. № 1. Pp. 128-130.(rus)
17. Lalin V. V., Rybakov V. A. The finite elements for design of building walling made of thin-walled beams // Magazine of Civil Engineering. 2011. № 8. Pp. 69-80.(rus)
18. Alkhimenko A. I., Vatin N. I., Rybakov V. A. *Tekhnologiya legkikh stalnykh tonkostennykh konstruksiy* [Tech light steel thin-walled structures]. SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 27 p.(rus)
19. Hicks S., Davies C. Light Steel-framed house gets the earthquake test // Build. October/November 2009. Pp. 54-55.
20. Zhmarin Ye. N., Rybakov V. A. *LSTK – instrument dlya realizatsii programmy «Dostupnoye i komfortnoye zhilye»* [LSTC - a tool for the implementation of the program "Affordable Housing"] // *StroyPROFIL*. 2007. № 7(61). Pp. 166-167.(rus)
21. Keerthan P., Mahendran M. Thermal performance of load bearing cold-formed steel walls under fire conditions using Numerical studies // Journal of Constructional Steel Research. 2013. №80. Pp. 412-428.
22. 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
23. Dubina D., Ungureanu V., Szabo I. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 179-186.

24. Koiter, W. T. The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load. Rep. № 5287, National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands). 2012. Pp. 365-374.
25. Sarawit A. T., Kim Y., Bakker M. S M., Pekoz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448
26. Mamalis A. G., Manolakos D. E., Ioannidis M.B., Kostazos P.K., Dimitriou C. Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section // Thin-Walled Structures. 2003. Vol. 41. Issue 10. Pp. 891-900.
27. Rasmussen J. R. Kim. Bifurcation of locally buckled point symmetric columns - Experimental investigations // Thin-Walled Structures. 2006. Vol. 44. Issue 11. Pp. 1175-1184.
28. Chen Ju, Young B. Cold-formed steel lipped channel columns at elevated temperatures // Engineering Structures. 2007. Vol. 29. Issue 10. Pp. 1161-1174.
29. Silvestre N., Young B., Camotima D. Non-linear behaviour and load-carrying capacity of CFRP-strengthened lipped channel steel columns // Engineering Structures. 2008. Vol. 30. Issue 10. Pp. 2613-2630.
30. Rogers C. A., Yang D., Hancock G. J. Stability and ductility of thin high strength G550 steel members and connections // Thin-Walled Structures. 2003, Vol. 41. Issues 2-3. Pp. 149-166.
31. Becque J., Lecce M., Rasmussen J. R. Kim. The direct strength method for stainless steel compression members // Journal of Constructional Steel Research. 2008. Vol. 64. Issue 11. Pp. 1231-1238.
32. Zverev V. V. *Effektivnyye stroitelnyye metallokonstruksii na osnove obyemno-formovannogo tonkolistovogo prokata: Issledovaniye, proyektirovaniye, izgotovleniye* [Effective metalwork on the basis of the molded body-rolled products: Research, design, manufacture]. Lipetsk, 2000. 395 p.(rus)
33. Vatin N. I., Popova Ye. N. *Termoprofil v legkikh stalnykh stroitelnykh konstruksiyakh* [Thermoprofile in light steel building structures]. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2006. 63 p.(rus)
34. Orlova A. V., Zhmarin Ye. N., Paramonov K. O. Power efficiency of houses from light-gauge steel structures // Construction of Unique Buildings and Structures. 2013. № 6 (11). Pp. 1-13.(rus)
35. Ayrumyan E. L., Galstyan V. G. *Issledovaniye deystvitelnoy raboty tonkostennykh kholodnogutykh progonov iz otsinkovannoy stali* [Research of active thin cold-runs of galvanized steel] // *Promyshlennoye i grazhd. str-vo*. 2002. № (6). Pp. 31-34.(rus)
36. Ayrumyan E. L. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu konstruksiy karkasa maloetazhnykh zdaniy i mansard iz kholodnogutykh stalnykh otsinkovannykh profilye proizvodstva OOO «Baltprofil»*. [Recommendations for the design, fabrication and installation of the frame structures of low-rise buildings and attics of cold-formed galvanized steel profiles produced by "Baltprofil"] M.: TsNIIPSK im. Melnikova. 2004. 64 p.(rus)
37. Ayrumyan E. L., Kamenshchikov N. I. *Ramnyye konstruksii stalnogo karkasa iz otsinkovannykh gnutnykh profilye dlya odnoetazhnykh zdaniy razlichnogo naznacheniya* [Frame a steel frame of galvanized curved profiles for single-storey buildings for various purposes] // *Mir stroitelstva i nedvizhimosti*. 2006. №36. Pp. 9-11.(rus)
38. *Legkiye stalnyye karkasy iz otsinkovannykh gnutnykh profilye dlya odnoetazhnykh zdaniy massovogo primeneniya* [Light steel framing galvanized curved profiles for single-storey buildings of mass application / Ayrumyan E. L., Belyayev V. F., Kaganov A. A., Rummyantseva I. A. // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2003. № 6. Pp. 23-24.(rus)
39. Ayrumyan E. L., Boiko O. I., Kamynin S. V. Effective use of cold-formed steel structures for low-story urban buildings. Improvement of Buildings' Structural Quality by New Technologies // Proceedings of the Final Conference of COST Action C12. 2005. Pp. 431-437.(rus)
40. *Bystrovozvodimyye maloetazhnyye zdaniya s primeneniym legkikh stalnykh tonkostennykh konstruksiy* [Prefabricated low-rise buildings with the use of light steel thin-walled structures] / Pavlov A. B., Ayrumyan E. L., Kamynin S. V., Kamenshchikov N. I. // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2006. № 9. Pp. 51-53.(rus)
41. Belyy G. I., Ayrumyan E. L. *Issledovaniya raboty stalnoy fermy iz kholodnogutykh profilye s uchetom ikh mestnoy i obshchey ustoychivosti* [Studies of steel cold-formed profiles of farms with regard to their local and general stability] // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2010. № 5. Pp. 35-38. (rus)
42. Tusnin A. R. *Chislenny raschet konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya*. [Numerical calculation of structures of thin-walled open section] M: Izdatelstvo ASV, 2009. 144 p.(rus)
43. Kolesov A. I., Yambayev I. A., Morozov D. A. *O rezervakh nesushchey sposobnosti szhato-izognutykh sterzhney* [About reserves bearing capacity compressed-bent rods] // *Elektronnyy zhurnal. Predotvrashcheniye avariyy zdaniy i sooruzheniy*, 2010. 12 p. (rus)

44. Nekhayev G. A. *Legkiye metallicheskiye konstruksii*. [Light metal structural work] Tula: Izd OOO «ProfStalProkat», 2012. 90 p. (rus)
45. Timoshenko S. P., Gudyer Dzh. *Teoriya uprugosti*. [Theory of Elasticity] SPb.: Izd-vo Nauka, 1979, 450 p.(rus)
46. Zhmarin Ye. N. International association of light-gauge steel construction // Construction of Unique Buildings and Structures. 2012. №2. Pp. 27-30.(rus)
47. Vatin N. I., Zhmarin Ye. N., Kurazhova V. G., Usanova K. Yu. *Konstruirovaniye zdaniy i sooruzheniy. Legkiye stalnyye tonkostennyye konstruksii: ucheb. Rukovodstvo*. [Construction of buildings and structures. Light steel thin-walled structures] SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012, 266 p.(rus)
48. Belyy G. I. *Osobennosti raboty sterzhnevyykh elementov konstruksiy iz otsinkovannykh gnutykh profiley* [Features of core design elements of galvanized curved profiles] // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012 . № 3. Pp. 99-103. (rus)
49. Belyy G. I. *K raschetu na ustoychivost sterzhnevyykh elementov stalnykh konstruksiy* [On the calculation of the stability of core elements of steel structures] // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2013. № 2 (37). Pp. 44-48.(rus)
50. Belyy A. G. *Deformatsionnyy raschet i ustoychivost tonkostennykh prizmaticheskikh sterzhney proizvolnogo profilya szhatykh s dvukhosnym eksstentrisitetom / diss. na soisk. uchen. step. k.t.n., Spets.: 05.23.17*. [Deformation calculation and stability of thin-walled prismatic bars of arbitrary profile biaxial eccentric compression] SPb., 2000. 114 p.(rus)
51. Shishkin V. M. *Razrabotka effektivnykh metodov rascheta tonkostennykh konstruksiy s uchetom plasticheskikh i dempfiyuyushchikh svoystv materiala / diss. na soisk. uchen. step. d.t.n. Spets.: 05.13.18*. [Development of effective methods for calculating thin-walled structures based on plastic and damping properties of the material] Kazan, 2008. 414 p.(rus)
52. Chernov S. A., Dyakov I. F. *K raschetu prostranstvennoy tonkostennoy sterzhnevoy sistemy* [On the calculation of spatial thin-walled rod system] // *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii: yezhemesyachnyy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskij zhurnal*. 2008. №2. Pp. 3-6.(rus)
53. Tugayev A. S. *Ustoychivost plastin i tonkostennykh sterzhney / diss. na soisk. uchen. step k.t.n. Spets.: 01.02.03*. [Stability of plates and thin-walled] M, 2007, 151 p.(rus)
54. Timoshenko S. P. *Ob ustoychivosti uprugikh sistem*. [Stability of elastic systems] K.: Izd-vo Kiyevskogo politekhnicheskogo instituta. 1910. Kn.4. 182 p.
55. Tananayko O. D., Shvarts M. A. *Smeshannyy metod rascheta sterzhnevyykh sistem na prochnost, kolebaniya i ustoychivost* [Mixed method for calculating the strength of the rod systems, vibrations and stability] // *Trudy LIIZhT. SPb.: Izd-vo SPbGUPS*, 1976. Pp. 23-28.(rus)
56. 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 Standardization.
57. SP 16.13330.2011 *Stalnyye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81*. [SP 16.13330.2011 Steel structures. Updated edition SNIP II- 23-81] (rus)
58. Belov I. D., Yurchenko V. V. *Pro proverku ustoychivosti tsentralno-szhatykh sterzhney iz odinochnykh tonkostennykh kholodnognutykh profiley otkrytogo secheniya* [Check the stability of the central compressed rods of single walled cold-formed profiles open section] // *Metallicheskiye konstruksii*. 2010. Vol. 16. № 4. Pp. 239-250. (rus)
59. Smaznov D. N. *Konechno-elementnoye modelirovaniye raboty zhestkikh vstavok tonkostennykh kholodnoformovannykh stalnykh profiley* [MFE modeling of behave of stiffeners for thin walled steel profiles] // *Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011. № 67. Pp. 101-113.(rus)
60. Smaznov D. N. *Konechno-elementnoye modelirovaniye stoyek zamknutogo secheniya kholodnognutykh profiley* [Finite element modeling racks closed section cold-formed profiles] // *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2011. № 123. Pp. 334-337.(rus)
61. Shatov D. S. Finite modeling of thin-walled perforated studs // Magazine of Civil Engineering. 2011. № 3. Pp. 32-35.(rus)
62. Dyakov S. F., Lalin V. V. *Postroyeniye i analiz konechnyykh elementov tonkostennogo sterzhnya otkrytogo profilya s uchetom deformatsiy sdviga pri kruchenii* [Building and finite element analysis of thin-walled rod of open profile considering shear deformation in torsion] // *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 2. Pp. 130-140.(rus)

63. Dyakov S. F. *Sravnitelnyy analiz zadachi krucheniya tonkostennogo sterzhnya po modelyam Vlasova i Slivkera* [Comparative analysis of the problem of torsion of thin-walled bar brands Vlasov Slivkera] // *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2013. № 1 (1). Pp. 24-31.(rus)
64. Nazmeyeva T. V. *Obespecheniye prostranstvennoy zhestkosti pokrytiya v zdaniyakh iz LSTK* [Providing spatial rigidity coverage in buildings of LSTC] // *Magazine of Civil Engineering*. 2009. №6. S. 12-15.(rus)
65. Marchenko T. V., Bannikov D. O. *Sopostavitelnyy analiz form poteri ustoychivosti tonkostennykh sterzhnevnykh elementov* [Comparative analysis of the buckling of thin-walled beam elements] // *Metallicheskiye konstruksii*. 2009. T. 15. № 3. Pp. 177-188.(rus)
66. Ulshin A. N. *Obobshchenny pokazatel kachestva stalnykh konstruksiy* [Composite quality index of steel auxiliary bar structures] // *Magazine of Civil Engineering*. 2011. № 7. Pp. 62-70.(rus)
67. Katalonskaya M. A. *LSTK – bystroye resheniye dlya stroitelstva dostupnogo zhilya* [STC - Quick solution for affordable housing] // *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2008. №10. Pp. 75-75.(rus)
68. Guseva T. P. *Innovatsionnyye tekhnologii dlya zhilishchnogo stroitelstva* [Innovative technologies for housing] // *Zhilishchnoye stroitelstvo*. 2009. № 4. Pp. 4-6.(rus)
69. Subbotin S. L. *Izgib i krucheniye tonkostennykh sterzhney pri temperaturnykh vozdeystviyakh*. [Bending and torsion of thin-walled at temperature influences] Kalinin, 1984. 185 p.(rus)
70. Tambovtseva M. Ye. *Sovremennoye sostoyaniye i problemy innovatsii v individualnom stroitelstve* [Current status and problems of innovation in individual housing] // *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2011. № 2. Pp. 7.(rus)
71. Perelmuter A. V., Yurchenko V. V. *O raschete prostranstvennykh konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [About calculation of spatial structures of thin-walled open section] // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2012. № 6. Pp. 18-25.(rus)
72. Perelmuter A. V., Slivker V. I., *Ustoychivost ravnovesiya konstruksiy i rodstvennyye problemy*. [Stability of equilibrium structures and related problems] M.: Izd-vo SKAD SOFT, 2011. 388 p.(rus)
73. Perelmuter A. V., Slivker, V. I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza*. [Computational models of structures and the possibility of their analysis] M.: Izd-vo DMK Press, 2002. 618 s.(rus)
74. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Perelmuter A. V., Perelmuter M. A. *SCAD OFFICE. Formirovaniye secheniy i raschet ikh geometricheskikh kharakteristik*. [SCAD OFFICE. Formation cross sections and calculation of their geometric characteristics] M.: Izd-vo ASV, 2004. 80 p.(rus)
75. Yurchenko V. V. *Proyektirovaniye karkasov zdaniy iz tonkostennykh kholodnognutnykh profiley v srede «Scad office»* [Design of building frames of thin cold-formed profiles among «SCAD Office»] // *Magazine of Civil Engineering*. 2010. № 8. Pp. 38-46.(rus)
76. Gordeyeva A. O., Vatin N. I. *Raschetnaya konechno-elementnaya model kholodnognutogo perforirovannogo tonkostennogo sterzhnya v programmno-vychislitelnom komplekse «SCAD Office»* [Finite element calculation model of thin-walled cold-formed profile in software package «SCAD Office»] // *Magazine of Civil Engineering*. 2011. № 3. S. 36-46.(rus)
77. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Malyarenko A. A. et. al. *Vychislitelnyy kompleks SCAD*. [Estimated finite element model of cold-perforated thin-walled bar in the software and computing complex SCAD Office] M.: Izd-vo ASV, 2007. 592 p.(rus)
78. Kuzmin N. A., Lukash P. A., Mileykovskiy I. Ye. *Raschet konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney i obolochek*. [Structural analysis of thin rods and shells] M.: Izd-vo Gosstroyizdat, 1960. 264 p. (rus)
79. Osokin A. V. *Razvitiye metoda konechnykh elementov dlya rascheta sistem, vkhlyuchayushchikh tonkostennyye sterzhni otkrytogo profilya / diss. na soisk. uchen. step. k.t.n. Spets.: 05.23.17*. [Development of the finite element method for the calculation of systems, including thin-walled open profile] M., 2010. 134 p.(rus)
80. Kosykh E. G. *Poperechnyy izgib tonkostennogo sterzhnya s peremennoy po dline zhestkostyu*. [Transverse bending thin-walled bar with variable stiffness along the length] Minsk : Izd-vo tsentr BGU, 2013. 3 p.
81. Umanskiy A. A. *Krucheniye i izgib tonkostennykh aviakonstruksiy*. [Torsion and bending thin aviakonstruksiy] M.:Izd-vo Oborongiz, 1939. 112 p.(rus)
82. Malinin M. Yu. *Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya prostranstvennykh tonkostennykh konstruksiy slozhnoy geometrii metodom konechnykh elementov / diss. na soisk. uchen. step. k.t.n. Spets.:01.02.04*. [Investigation of the stress-strain state of spatial thin-walled structures of complex geometry using finite element method] Brezhnev, 1984. 153 p.(rus)
83. Kamenskikh I. V. *Matematicheskoye i chislennoye modelirovaniye zadach ustoychivosti tonkostennykh konstruksiy metodom modul-elementov / diss. na soisk. uchen. step. d.f-m. n. Spets: 05.13.18*. [Mathematical

- and numerical modeling of problems of stability of thin-walled structures using modular elements] *Komsomolsk-na-Amure*, 2004. 210 p.(rus)
84. Vorobyev L. N. *Deformatsionnyy raschet i ustoychivost tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [Deformation calculation and stability of thin-walled open section] // *Trudy Novochoerkasskogo politekhnicheskogo instituta. Novochoerkassk: Izd-vo YuRGPU(NPI)*, 1958. Tom 69/83. Pp. 3-48.(rus)
 85. Vetyukov Yu. M., Yeliseyev V. V. *Uprugiye deformatsii i ustoychivost ravnovesiya tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [Elastic deformation and stability of equilibrium of thin-walled open section] // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2007. № 52-1. Pp. 49-53.(rus)
 86. Bychkov D. V. *Raschet balochnykh i ramnykh sterzhnevnykh sistem iz tonkostennykh elementov*. [Calculation of beam and frame rod systems of thin-walled elements] M.: *Izd-vo Stroyizdat*, 1948. 208 p.(rus)
 87. Brudka Ya., Lubinski M. *Legkiye stalnyye konstruksii*. [Light steel structures] M., *Stroyizdat*, 1974. 342 p.
 88. Anuchkin A. P. *Izyskaniye optimalnykh form balok i kolonn iz tonkostennykh shtampovannykh profiley / diss. na soisk. uchen. step. k.t.n. Spets.: 05.23.01*. [Finding the optimal forms of beams and columns of thin-walled extruded profiles] M., 1949. 169 p.(rus)
 89. Aleksandrov V. G. *Raschet tonkostennykh nerazreznykh balok na sovmestnoye deystviye izgiba i krucheniya pri podvizhnoy nagruzke / diss. na soisk. uchen. step. k.t.n. Spets.: 05.23.01*. Rostov n/D, [Calculation thin continuous beams the combined effect of bending and twisting when moving load] 1948. 130 p.(rus)
 90. Belousov V.P. *Issledovaniye ustoychivosti sterzhney pri prodolnom i poperechnom nagruzhenii / diss. na soisk. uchen. step. k.t.n. Spets.: 01.02.03*. [Dispersion of torsional waves propagating in thin-walled rod] *Dzhambul*, 1983. 215 p.(rus)
 91. Dyakov S.F., Lalin V.V. *Dispersiya krutilnoy volny, rasprostranyayushchayasya v tonkostennom sterzhne* [The dispersion of the torsion wave in the thin-walled bar] // *Internet-zhurnal «Naukovedeniye»*, 2013. № 5 (18) 10 p.(rus)
 92. Dyakov S. F., Lalin V. V. *Postroyeniye i analiz konechnogo elementa tonkostennogo sterzhnya s uchetom deformatsiy sdviga dlya resheniya zadach dinamiki* [The construction and analysis of the thin-walled bar finite element with allowing for shearing for the dynamic problems] // *Internet-zhurnal «Naukovedeniye»*, 2013. № 5 (18). 10 p.(rus)
 93. Nazmeyeva T.V. Bearing capacity of compressed continuous and perforated thin-walled steel members of C-shaped cold formed profiles // *Magazine of Civil Engineering*. 2013. №5(40). Pp. 44–51.(rus)
 94. Nazmeyeva T.V. Providing spatial rigidity coverage in buildings of steel structures // *Magazine of Civil Engineering*. 2009. № 6(8). Pp. 12-15.(rus).