

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Инженерно-строительный институт  
институт  
Строительные конструкции и управляемые системы  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
С. В. Деордиев  
подпись                      инициалы, фамилия  
«  »                      20   г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Совершенствование методики расчета несущих элементов НФС с учетом  
эффективных характеристик сечений

Тема

08.04.01 Строительство

код и наименование направления

08.04.03.01 Теория и проектирование зданий и сооружений

код и направление магистерской программы

Научный руководитель	<u>                    </u> подпись, дата	<u>доцент кафедры канд.техн.наук</u> должность, ученая степень	<u>А.В. Фроловская</u> инициалы, фамилия
Выпускник	<u>                    </u> подпись, дата	<u>411624435</u>	<u>Ю.М. Петрова</u> инициалы, фамилия
Рецензент	<u>                    </u> подпись, дата	<u>                    </u> должность, ученая степень	<u>А.Г. Матыскин</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2022

## ВВЕДЕНИЕ

Выход долгожданной нормативной базы в 2016 году для проектирования и расчета ЛСТК в России дал наконец возможность учитывать особенности данных конструкции, что являлось проблемой долгие годы.

Целью работы холодноформованных конструкций навесных фасадных систем (НФС).

Задачи:

1. Анализ существующих конструктивных решений, методик расчета холодногнутых оцинкованных профилей.
2. Анализ напряженно-деформированного состояния (численные и экспериментальные исследования) профилей КРАСПАН с учетом эффективных характеристик и без.
3. Экспериментальные исследования профилей, работающих на сжатие. Сравнение результатов с численными исследованиями.
4. Совершенствование методики расчета несущих элементов НФС с учетом эффективных характеристик сечений.

# І ГЛАВА

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

### 1.1 История развития легких стальных тонкостенных конструкций

Австралийский профессор Gregory J. Hancock в своей работе [18] вывел четкое определение легких стальных тонкостенных конструкций

Развитие холодногнутой конструкции продолжалось и во время Второй мировой войны и после нее.

На основе его разработок составлены сортаменты профилей, и изданы рекомендации по расчету холодногнутой профилей [7]. На рисунке 1.1 представлены профили повышенной жесткости, разработанные вышеуказанным автором.

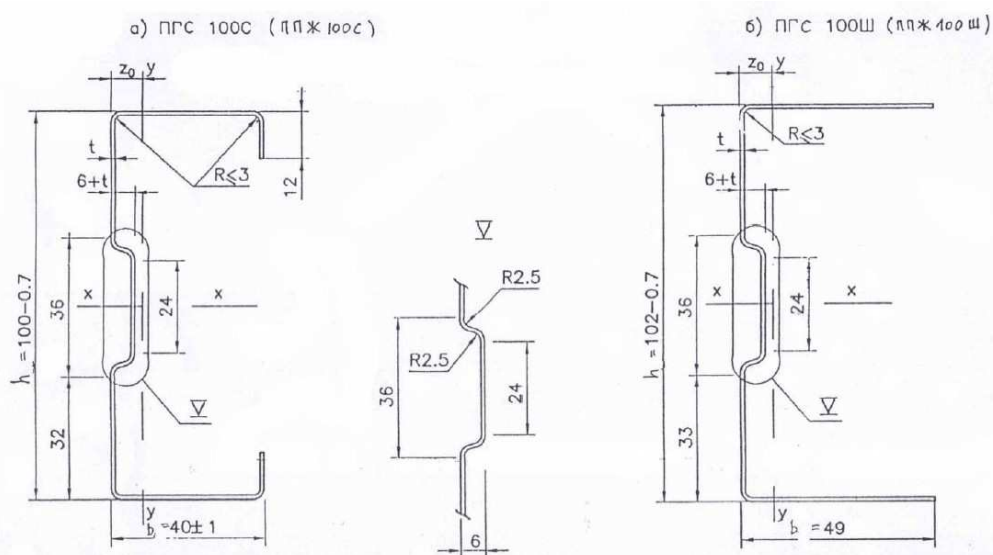


Рисунок 1.1 – Профили повышенной жесткости (ППЖ) марок ПГС 100С и ПГС 100Ш ТУ 1122-181 (или ППЖ 100С и 100Ш по ТУ 1122-080)

В 2016 году выпущен 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутой оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования», что позволяет строительству из легких тонкостенных конструкций набирать обороты и открывать новые направления развития.

На сегодняшний день производством гнутых профилей в России занимаются более ста заводов и компаний - изготовителей (Технониколь, КРАСПАН и тд). В Красноярске, например, производитель ЛСТК конструкций для навесных фасадных систем - это завод КРАСПАН.

С использованием ЛСТК можно строить как жилые дома (коттеджи, малоэтажные сблокированные постройки), так и коммерческую недвижимость (торговые комплексы, административные здания, производственные помещения, гостиницы, автозаправочные станции). Например, в условия нынешних реалий скорость возведения ЛСТК конструкций помогает возводить медицин-

ские объекты в кратчайшие сроки. Так в ноябре 2020 года в городе Челябинск возвели инфекционную больницу за 2 месяца для оперативного лечения больных Covid 19.



Рисунок 1.2 – Челябинский областной инфекционный центр

## 1.2 Достоинства и недостатки ЛСТК

Хотя история развития ЛТСК и началась более 50 лет, в наших суровых климатических условиях такие конструкции начали использоваться относительно недавно. Следовательно, практический опыт строительства подобных зданий пока не нашёл значительной апробации в Сибири. Поэтому анализ достоинств и недостатков холодногнутых оцинкованных профилей в работе я сделала по отзывам и рекомендациям заводов - изготовителей других регионов России.

В качестве достоинств производители выделяют следующие показатели.

1. **Высокая скорость монтажа, то есть** короткие сроки возведения.
2. **Малый удельный вес.** Здание из ЛСТК не оказывает большого давления на основание. Вес 1 кв. м несущего стального каркаса здания находится в пределах 30-50 кг, а вес 1 кв. м готового здания в среднем составляет 200 кг.
3. Низкая трудоемкость при возведении. При монтаже не требуется тяжелые грузоподъемные механизмы, так как вес одного элемента не превышает 100 кг.
4. **Сейсмостойкость.** За счет этого строительство по данной технологии приобрело широкое распространение в Японии.
5. **Простая транспортировка строительных элементов ЛСТК, заключается в том, что нет необходимости в специальных мероприятиях по их доставке на строительную площадку.**
6. **Высокое качество.** Обеспечивается тем, что все элементы изготавливаются на заводе или специализированном предприятии.

7. **Относительно низкая стоимость строительства.** Стоимость 1 м<sup>2</sup> жилого помещения «под ключ» составляет примерно 400...500\$. Здания, построенные с применением ЛСТК, имеют стабильные размеры, хорошо защищены от влияния биологических и температурно-влажностных процессов, долговечны, энергоэкономичны.

11. **Безопасная сборка.** Сборка (разборка) конструкций выполняется без применения сварочных работ.

12. **Экологичность.** Тонкостенные конструкции считают биостойким материалом, так как на них не приживается плесень, грибок. При этом в качестве обшивки обычно применяются гипсокартонные и гипсоволокнистые листы, а в качестве утеплителя - каменная вата или эковата

13. **Надежность и долговечность.** Высокая степень надежности строений из ЛСТК обеспечивается стабильностью размеров стальных профилей, которые не подвержены влиянию биологических и влажностно-температурных процессов. Долговечность определяется в основном сроком службы металлокаркаса, плитных материалов обшивки и утеплителя. При использовании ЛСТК, профили которых изготавливаются из оцинкованной стали с нормой расхода цинка 275 г/кв.м, долговечность конструкций составляет порядка 100 лет согласно исследованиям British Steel. Хотя при некачественном цинковом покрытии, этот пункт можно отнести и к недостаткам.

14. **Широкие архитектурные возможности и области применения.**

Способность конструкций перекрывать пролеты до 14 м без промежуточных опор по кровле и до 8 м - по межэтажным перекрытиям

Таблица 1.1 - Сравнение основных характеристик при строительстве из традиционных строительных материалов и ЛСТК

Характеристики	Кирпич М-150 t=400 мм (250 - кирпич, 150 - утепление)	Кирпич М-150 t=740 мм (640 - кирпич, 100 - утепление)	Пеноблок D-500 t=350 мм (200 - кирпич, 150 - утепление)	Твинблок ТБ-200 t=350 мм (200 - твинблок, 100 - утепление)	Газоблок t=200 мм (200 - газоблок, 150 - утепление)	ЛСТК t=150 мм
Трудозатраты на 1 кв.м., ч/ч	6,5	14,6	3,7	3,8	3,8	1,5
Скорость монтажа 100 кв.м. стены, дни	12	27	10	10	10	2,5-3

Стоимость 1 кв.м. стены, руб.	4260	9300	3250	3500	3500	2030
Подготовка внутренней поверхности стены к чистовой отделке	штукатурка или облицовка ГКЛ	штукатурка или облицовка ГКЛ	штукатурка или облицовка ГКЛ	штукатурка или облицовка ГКЛ	штукатурка или облицовка ГКЛ	не требует, поверхность готова к чистовой отделке
Вес 1 кв.м. стены, кг	420	1040	125	140	135	40

В качестве недостатков можно выделить следующие показатели:

1. Долговечность несущих конструкций ЛСТК и здания (сооружения) зависит от качества производства стальных профилей и монтажа конструкций ЛСТК. Например, их долговечность в Сибири составляет около 50 лет (в результате коррозии оцинкованного профиля), что ниже, по сравнению с каменными, бетонными и кирпичными зданиями. Элементы могут изготавливаться из стали с цинковым покрытием – до  $120 \text{ г/м}^2$  и более  $350 \text{ г/м}^2$ , что зависит от производителя. Хотя, при идеальном варианте, этот пункт можно отнести и к достоинствам.
2. Изготовление легких стальных тонкостенных конструкций производится только на заводе, при этом для качественного изготовления требуется дорогостоящее оборудование.
3. Низкая огнестойкость стальных конструкций каркаса здания, полностью зависящая от обшивок каркаса.
4. Невозможность повторного использования элементов, в отличие от "черного" металла.

### 1.3 Существующие конструктивные решения легких стальных тонкостенных конструкций

Существует большое разнообразие не только конструктивных решений ЛСТК, но и типов их поперечных сечений.

Основой конструктивной системы навесных фасадов из ЛСТК является каркас из гнутых профилей Г-образного, Т-образного (включая составной вариант), углового и U-образного сечений из стали толщиной не менее 1 мм и не более 2,5 мм (рис. 1.3,1.4).

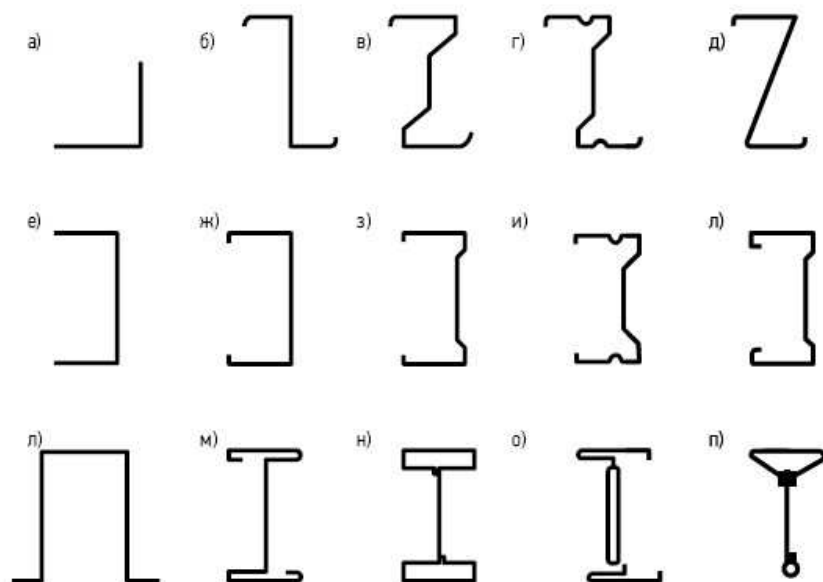


Рисунок 1.3 - Типичные одиночные профили открытого сечения



Рисунок 1.4 - Типичные составные профили а) открытого сечения  
б) закрытого сечения

Линейные элементы могут быть выполнены из одиночных профилей открытого сечения (см. рисунок 1.3) и из составных профилей открытого и закрытого сечения (см. рисунок 1.4). Сфера применения этих элементов довольно широка, например, балки небольшого пролета, кровельные или стеновые прогоны, отдельно стоящие колонны или стойки стеновых конструкций, пояса ферм. Высота холодногнутох профилей находится в пределах от 50 до 300 мм, иногда она достигает 500 мм.

Конструкции из тонкостенных профилей НФС отличаются тем, что имеют гораздо меньший вес по сравнению с аналогичными по функциям конструкциями из силикатных блоков, кирпича, бетона.

Конструктивные решения навесных фасадных систем с использованием ЛСТК профилей компании КРАСПАН представлены на рисунке 1.6.

L-образная подсистема



Способ крепления : кассета

U-образная подсистема



Способ крепления : кассета

Система крепления в межэтажные перекрытия



Способ крепления : кассета

Рисунок 1.6 - Конструктивные решения навесных фасадных систем с использованием ЛСТК компании КРАСПАН



## 1.5 Технология ЛСТК НФС

Технология монтажа легких стальных тонкостенных конструкций в составе навесных фасадных систем довольно проста и надежна.

Основной способ монтажа конструкций ЛСТК НФС - поэлементный монтаж. Каркас собирается на строительной площадке, с заранее доставленными профилями нужных размеров и промаркированными. Бригада строителей производит сборку при помощи ручных инструментов.

Этапами монтажа являются:

- установка обрамлений,
- установка кронштейнов,
- установка плит теплоизоляции,
- установка паропроницаемой гидроветрозащитной мембраны (при необходимости),
- установка направляющих,
- выставление направляющих по плоскостям,
- установка облицовочных материалов (плит, панелей, кассет),
- удаление следов грязи с облицовочной поверхности.

### **Выводы по главе 1:**

Существует большое разнообразие конструктивных решений легких стальных тонкостенных конструкций из оцинкованной стали. Но с учетом незначительного опыта строительства и проектирования таких конструкций в Сибири, и не так давно выпущенной официальной утвержденной нормативно-технической документации, данные решения требуют детальной проработки и апробации во времени.

## **ГЛАВА II**

### **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛСТК**

#### **2.1 Анализ существующих методик расчета**

В данной работе проведен анализ нормативных документов и описанных в них методик расчета. Сравнительный анализ методик расчета на примере изгибаемых элементов приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Сравнительный анализ методик расчета на примере изгибаемых элементов

	СП 260.1325800.2016 [1]	Eurocode 3[14]	Методика Власов В.З. [8]
Прочность	<p>1. Расчет на прочность поперечного сечения по изгибающему моменту относительно одной из главных осей <math>M_x</math>.</p> <p>-если момент сопротивления эффективного сечения <math>W_{x,eff}</math> менее, чем момент сопротивления полного упругого сечения <math>W_x</math>,</p> $\frac{M_x}{W_{x,eff} R_y \gamma_c} \leq 1; \quad (2.1)$ <p>- если момент сопротивления эффективного сечения <math>W_{x,eff}</math> равен моменту сопротивления полного упругого сечения <math>W_{x,min}</math>,</p> $\frac{M_x}{W_{x,min} R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (2.2)$ <p>2. При изгибе в двух главных плоскостях:</p> $\frac{M_x}{W_{x,eff} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{W_{y,eff} R_y \gamma_c} \leq 1,0. \quad (2.3)$	<p>1. Расчетное значение изгибающего момента <math>M_{ed}</math> для любого сечения должно удовлетворять условию:</p> $\frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.0$ <p>Расчетная несущая способность поперечного сечения при изгибе относительно одной из главных осей <math>M_{c,Rd}</math> определяется следующим образом:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>если момент сопротивления эффективного сечения <math>W_{eff}</math> меньше, чем момент сопротивления полного упругого сечения <math>W_{el}</math>:  <math display="block">M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}</math> </li> <li>если момент сопротивления эффективного сечения <math>W_{eff}</math> равен моменту сопротивления полного упругого сечения <math>W_{el}</math>:  <math display="block">M_{c,Rd} = f_{yb} [W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) \psi (1 - \bar{\lambda}_{e,max} / \bar{\lambda}_{e0})] / \gamma_{M0}</math> </li> </ul> <p>но не более чем</p> $(W_{pl} \cdot f_{yb}) / \gamma_{M0}$ <p>где <math>\bar{\lambda}_{e,max}</math> - условная гибкость элемента, соответствующая наибольшему значению отношения <math>\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0}</math>.</p>	<p>Однопролетная балка защищена от бокового выпучивания, если выполняется условие:</p> $\lambda_y = \frac{c_y}{i_y} \leq 40,$ <p>где <math>c_y</math> - максимальное расстояние между жесткими креплениями сжимаемого пояса;  <math>i_y</math> - радиус инерции сечения сжатого пояса относительно оси балки.</p> <p>Если условие не выполняется, то наибольшее напряжение на оси сжатого пояса должно удовлетворять условию:</p> $\sigma_{max} = \frac{M_{max} z}{J_x} \leq 1.13 \beta_k$ <p>где <math>M_{max}</math> - максимальный изгибающий момент;  <math>z</math> - расстояние от оси сжатого пояса до главной центральной оси <math>x-x</math>.</p> $\sigma_{max} = \frac{M_{max} z}{J_x} \leq \frac{\sigma_{кр}}{n}$ <p>При удовлетворении этого условия балки можно считать защищенными от бокового выпучивания.</p> <p>Критического напряжения для балок с одним свободным и другим за-</p>

		<p>2. При изгибе относительно двух осей используется следующий критерий:</p> $\frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd}} \leq 1,$ <p>где <math>M_{y,Ed}</math> - изгибающий момент, действующий относительно оси y-y; <math>M_{z,Ed}</math> - изгибающий момент, действующий относительно оси z-z;  <math>M_{cy,Rd}</math> - предельный момент, воспринимаемый поперечным сечением, относительно оси y-y;  <math>M_{cz,Rd}</math> - предельный момент, воспринимаемый поперечным сечением, относительно оси z-z.</p>	<p>крепленным концом, а также для консолей неразрезных балок, двутавровое сечение которых имеет две оси симметрии, определяют по формуле:</p> $\sigma_{кр} = \frac{\chi \cdot h}{2 \cdot l \cdot J_x} \cdot \sqrt{E \cdot J_y \cdot G \cdot J_z}$ $\chi = \frac{E \cdot J_y}{G \cdot J_z} \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot l}\right)^2$ <p>где <math>h</math> - высота балки, измеренная между центрами тяжести поясов;  <math>l</math> - пролет балки;  <math>\chi</math> - коэффициент, зависящий от характеристик сечения</p>
Устойчивость	<p>Расчетное значение несущей способности по устойчивости плоской формы изгиба для балок, не раскрепленных из плоскости действия изгибающего момента, следует принимать равным:</p> $\frac{M_b}{\chi_{LT} W_{ef} R_y} \leq 1$ <p>где <math>\chi_{LT}</math> - понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба.</p>	<p>Элемент, изгибаемый относительно главной оси и не раскрепленный из плоскости действия изгибающего момента, следует проверять на устойчивость плоской формы изгиба по формуле:</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0.$ <p>где <math>M_{Ed}</math> - расчетное значение изгибающего момента;  <math>M_{b,Rd}</math> - расчетное значение несущей способности изгибаемого элемента по устойчивости плоской формы изгиба.  Расчетное значение несущей способности по устойчивости плоской формы изгиба для балок, не раскрепленных из плоскости дей-</p>	<p>Неукрепленные или укрепленные стенки стержней без поперечных ребер, подвергающихся изгибу, <u>внецентренному сжатию</u>, или <u>внецентренному растяжению</u>, следует проверять на местную потерю устойчивости, определяя наибольшее сжимающее напряжение <math>\sigma</math> на краю стенки по формуле:</p> $\sigma = \frac{\sigma_{кр}}{n}$ <p>где <math>\sigma_{кр}</math> - приведенное критическое напряжение стенки при местном выпучивании;  <math>n</math> - коэффициент надежности, принимаемый 1.4 для I рода допускаемых напряжений, 1.2 для II рода и</p>

		<p>ствия изгибающего момента, следует принимать равным:</p> $M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}$ <p>где <math>W_y</math> - соответствующий момент сопротивления сечения, принимаемый следующим образом:  <math>W_x = W_{eff}</math> для поперечных сечений класса 4;  <math>\chi_{LT}</math> понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба.          При определении <math>W_y</math> отверстия на конце балки учитывать не следует.</p>	<p>1.1 для предельных напряжений. В области упругой работы <math>\sigma_{кр}</math> определяются по следующим формулам для укрепленной стенки</p> $\sigma_{кр} = \kappa_1 \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{g}{b}\right)^2$ <p>для неукрепленной стенки</p> $\sigma_{кр} = \kappa_2 \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{g}{b_1}\right)^2$
Эффективные геометрические характеристики	<p>При постоянной толщине редуцируемого элемента редукция ведется за счет изменения ширины пластинки <math>b_{eff} = \rho b</math>, допускается также осуществлять редукцию изменением толщины <math>t_{ef} = \rho t</math>.</p> <p>- для гладких пластин закрепленных на кромках</p> $\rho = 1,0 \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 ; \quad (2.5)$ $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p} \leq 1,0; \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,673 ; \quad (2.6)$ <p>где <math>(3+\psi) \geq 0</math>.</p> <p>- для гладких пластин имеющих закрепление на одной кромке  <math>\rho = 1,0</math> для  <math>\bar{\lambda}_p \leq 0,748,</math></p>	<p>Эффективную ширину пластин, без элементов жесткости, следует определять по таблице 3 для сжатых элементов подкрепленных с двух сторон и по таблице 4 для сжатых элементов подкрепленных с одной стороны (консольные пластины). Теоретическая ширина плоского элемента <math>b_p</math> должна быть определена по рисунку 2.13. Для наклонных элементов принимается соответствующая наклонная высота. Понижающий коэффициент <math>\rho</math>, используемый в таблицах 2.3 и 2.4 для определения <math>b_{eff}</math>, определяется на основании наибольших напряжений сжатия, определенных для полного сечения. При максимальных напряжениях сжатия <math>\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}</math> понижающий коэффициент <math>\rho</math> определяется по следующим формулам:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• для сжатых элементов подкрепленных с двух сторон:</li> </ul>	Расчет отсутствует

<p>0.282 ≤ 0.748 0.12 ≤ 0.748</p> $\rho = \frac{\lambda_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p} \leq 1,0 \text{ для } \bar{\lambda}_p > 0,748, \quad (2.7)$ <p>где <math>\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}}</math></p> <p>Для гладких сжатых пластин, имеющих закрепления по двум продольным кромкам (например, полки швеллеров или угожков), коэффициент редуции определяют в зависимости от критического напряжения потери устойчивости пластинки <math>\sigma_{cr}</math>:</p> $\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)b^2}, \quad (2.8)$ <p>где <math>k_\sigma</math> - коэффициент, зависящий от граничных условий и характера напряжений в пластинке (таблицы 7.2, 7.3 СП); b - ширина пластинки; t - толщина пластинки; <math>\nu</math> - коэффициент Пуассона (для стали <math>\nu = 0,3</math>).</p> <p>Для стальной пластинки:</p> $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{28,4 t \epsilon \sqrt{k_\sigma}}, \quad (2.9)$	<p><math>\rho = 1,0</math> при <math>\bar{\lambda}_p \leq 0,673</math>.</p> $\rho = \frac{\lambda_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}^2} \leq 1 \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ когда } (3 + \psi)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• для сжатых элементов подкрепленных с одной стороны:</li> </ul> <p><math>\rho = 1,0</math> при <math>\bar{\lambda}_p \leq 0,748</math>.</p> $\rho = \frac{\lambda_p - 0,188}{\bar{\lambda}^2} \leq 1 \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,748,$ $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_p/t}{28,4 \epsilon \sqrt{k_\sigma}},$ <p>где, <math>\psi</math> - соотношение напряжений; <math>k_\sigma</math> - коэффициент, учитывающий потерю устойчивости в зависимости от соотношения напряжений <math>\psi</math> по краям пластины и условий их закрепления. Для длинных пластин значения коэффициента <math>k_\sigma</math> указаны в таблице 2.3 или таблице 2.4; <math>\epsilon</math> - отношение <math>\sqrt{235/f_{yb}}</math>, где <math>f_{yb}</math> в Н/мм<sup>2</sup>; t - толщина листа; <math>\sigma_{cr}</math> - упругое критическое напряжение потери устойчивости.</p> <p>В случае, когда напряжения сжатия <math>\sigma_{сж} \leq f_y/\gamma_{лв}</math>, понижающий коэффициент <math>\rho</math> определяется аналогично, но уменьшенная условная гибкость <math>\bar{\lambda}_{p,red}</math> вычисляется по формуле:</p>	
---	---	--

	где $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}}$ .	$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{yb}/\gamma_{M0}}}$ .	
--	--	---	--

## 2.2 Варианты проектирования холодных тонкостенных профилей

Проанализировав существующие методики расчета, можно сделать вывод, что методиками расчета являются Eurocode 3 и СП 260.1325800.2016. Сравнительный анализ показал, что они идентичны, по вышеуказанным документам допускается конструирование тонкостенных профилей. В данной работе все расчеты выполнены на основании действующего на территории РФ, документа, СП 260.1325800.2016. В положение методик расчета заложены требования Eurocode 3, на основе которых был разработан СП 260.1325800.2016 с учетом требований действующих на территории РФ.

Существуют численные и экспериментальные варианты проектирования тонкостенных профилей (рис. 2.1):

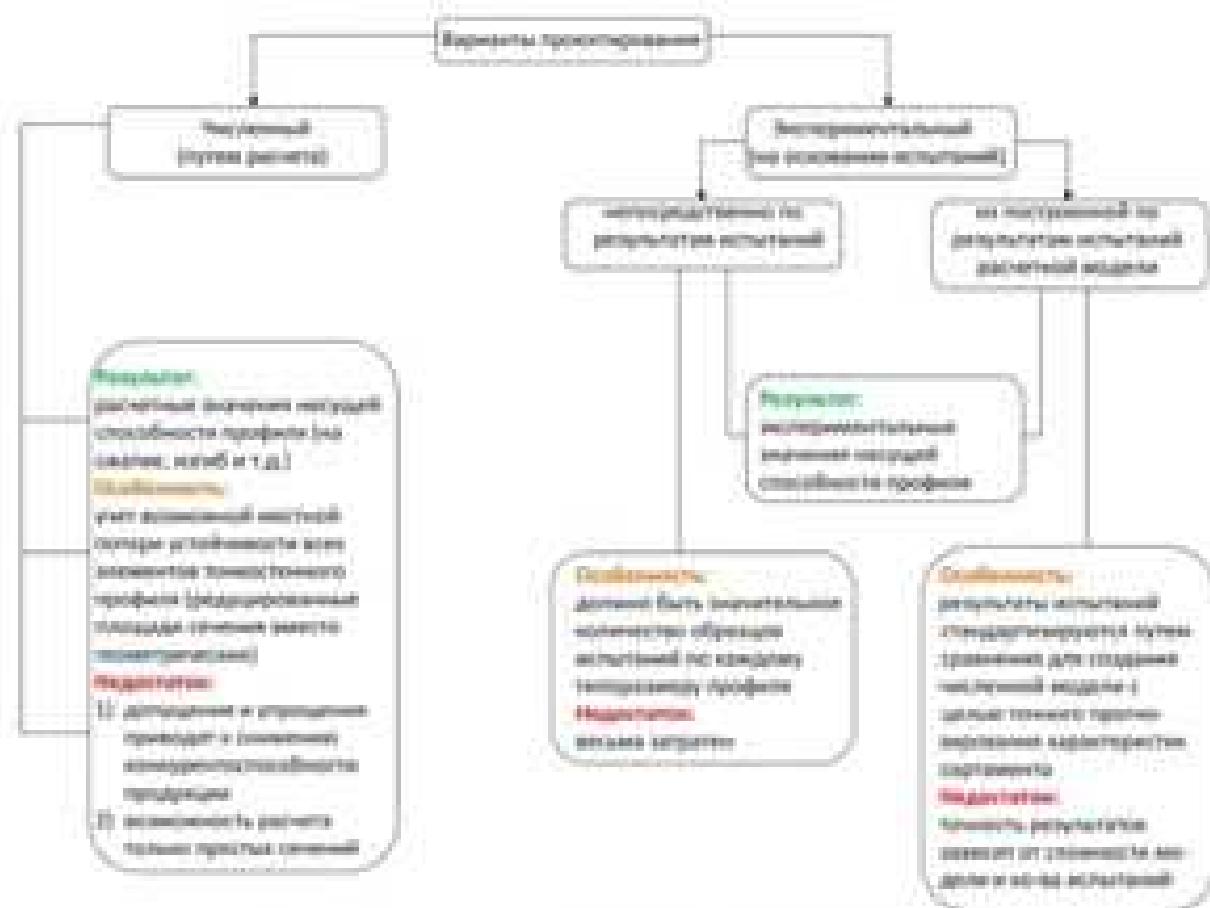


Рисунок 2.1 - Варианты проектирования тонкостенных профилей


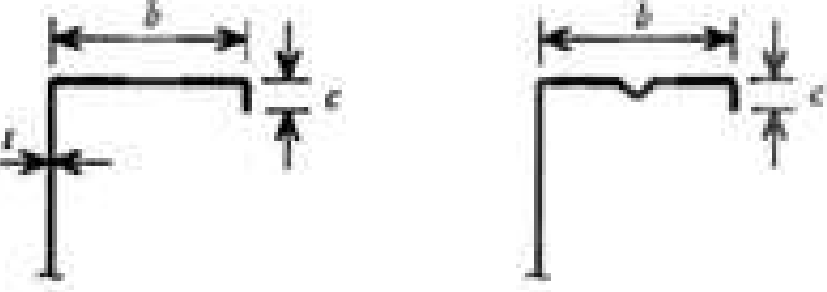
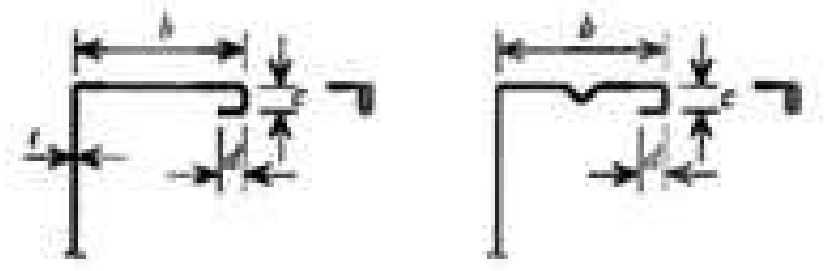
Между собой они отличаются принципиальным подходом первый – численный вариант на основе расчетов, а второй, экспериментальный, – на основе численных и натуральных исследований. Каждый вариант имеет отличительную особенность, достоинства и недостатки. В результате расчета по вариантам проектирования приведенных на рисунке 2.1, мы получаем несущую способность профилей независимо от подхода.

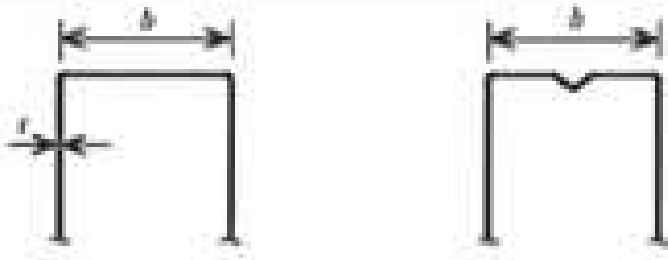
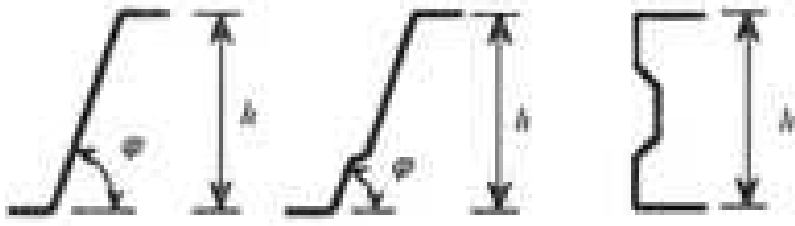


При проектировании необходимо учитывать соотношения геометрических параметров в тонкостенных профилях (таблица 2.2), обусловленные изготовлением конструкций на профилегибочных станках.

Требования для расчета, представленные в СП 260.132.5800.2016, распространяются на поперечные сечения, отношение ширины к толщине которых не выходит за пределы ограничений  $b/t$ ,  $h/t$ ,  $c/t$  и  $d/t$ , приведенных в таблице 2.2. Они представляют область, для которой накоплен достаточный теоретический и экспериментальный опыт.

Таблица 2.2 - Соотношения геометрических параметров сечений

Элементы выточечного сечения	Максимальное значение
	$b/t \leq 60$
	$b/t \leq 100$ $c/t \leq 40$
	$b/t \leq 100$ $c/t \leq 50$ $d/t \leq 40$

	$b/t \leq 300$
	$h/t \leq 300 \sin \varphi$ $45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$

### 2.3 Особенности расчета легких тонкостенных конструкций с учетом положений СП 260.13.25800.2016

#### 2.3.1 Расчет линейных параметров и геометрических характеристик сечения [2]

Прежде всего, для расчета несущей способности тонкостенного профиля на изгиб и другие виды напряженно-деформированного состояния, при различных видах нагрузок необходимо определить геометрические характеристики сечения.

На данном этапе определяются характеристики сечения брутто.

"Характеристики брутто" соответствуют геометрическим параметрам сечения без снижения и учета местной потери устойчивости отдельными участками. Процесс расчета характеристик сечения брутто для наиболее распространенных форм профилей относительно прост, поскольку он включает фактически суммирование элементарных площадей, статических моментов и моментов инерции (полки, стенки, элементов жесткости и др.), а также расчет расположения главных центральных осей сечения и моментов инерции всего сечения. Аналогичные процедуры могут дополнительно применяться для расчета других необходимых характеристик сечения брутто.

Однако существуют три важных вопроса, которые необходимо учесть при работе с тонкостенными стальными профилями:

- \* толщина стального листа

Однородная холоднокатаная рулонная сталь, которая используется для профилей ЛСТК, поставляется металлургическими предприятиями сразу с

цинковым покрытием, что означает включение толщины покрытия в номинальную толщину стали. Стандартное цинковое покрытие для строительной продукции составляет 275 г/м<sup>2</sup> (маркировка - Z275) [2], что соответствует толщине покрытия в 0,04 мм на каждой стороне поверхности.

Рекомендуемые значения толщины в соответствии с СП 260.13.25800:

$0,5 \text{ мм} \leq t_{\text{cov}} \leq 4 \text{ мм}$  для изготовления профилей и профилированных листов.

$0,05 \text{ мм} \leq t_{\text{cov}} \leq 4 \text{ мм}$  для накладки и стыков.

\* применение теории срединной линии

Теория срединной линии является обобщенной в практике, при этом радиусы закругления не принимаются в расчет. В результате мы имеем идеализированное сечение, которое состоит из тонких прямоугольных элементов. Следует внимательно вычитать смежные элементы, чтобы избежать двойного счета перекрывающихся угловых участков.

Этого можно легко достичь путем измерения длины каждого элемента между точками пересечения срединных линий. В результате чего, длина прямоугольного элемента становится меньше номинального значения на  $t/2$ , либо  $t$ , в зависимости от количества углов. Этот момент можно проследить на примере С-образного профиля с отгибами полок (рис. 2.2)



Рисунок 2.2 - Определение срединной линии для С-образного профиля с отгибами полок

\* влияние радиусов закругления

Использование теории срединной линии приводит к получению идеализированного сечения, анализ геометрических характеристик которого легко осуществим. Однако, если не сделать поправки геометрических характеристик сечения с учетом закруглений в углах контура, то это может существенно повлиять на их значения.

Согласно теории срединной линии [2], стенка и полка балки пересекаются в точке X – точке пересечения двух срединных линий. Но реальной точкой пересечения является P, расположенная на расстоянии  $g_r$  от X (рисунок 2.3), которое определяется следующим образом:

$$g_r = r_m \cdot \left( \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) \quad (2.10)$$

$$\text{где } r_m = r + \frac{t}{2} \quad (2.11)$$

$$\xi = 0.43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\alpha_j}{\sin \alpha_j}}{\sum_{i=1}^m b_{pi}} \quad (2.13)$$

где  $r_j$  - внутренний радиус  $j$ -го изгиба;  
 $n$  - количество изгибов (углов);  
 $\alpha_j$  - угол между двумя плоскими элементами;  
 $b_{pi}$  - условная ширина  $i$ -го плоского элемента;  
 $m$  - количество плоских элементов.

Дополнительно следует отметить, что при расчете тонкостенных профилей, в отличие от не тонкостенных конструкций, используются две гипотезы недеформированности контура и плоских сечений. Для холоднокатаных профилей из оцинкованной стали, гипотеза плоских сечений актуальна при условии небольших продольных деформаций и ограничении изменения формы поперечного сечения. Гипотеза недеформированности контура целесообразна в местах раскрепления профиля и при отсутствии кручения.

Предполагается, что в местах раскрепления профиля и при отсутствии кручения возможно с некоторой степенью приближения принять гипотезу о недеформированности контура поперечного сечения как действительную. Введение планок, ребер и вставок также повышает жесткость профиля и приближает к правоте применения гипотезы о неизменяемости контура поперечного сечения.

### 2.3.2 Расчет геометрических характеристик эффективного сечения [2]

Рассматривая местную потерю устойчивости стального тонкостенного профиля при определении эффективного сечения, профиль представляют как совокупность длинных пластин, жестко соединенных в местах изгиба. Также принимают, что гибкость пластин достаточно большая, и местная потеря их устойчивости происходит в упругой стадии. Поэтому площадь профиля может быть уменьшена в окончательных расчетах на значение, которому соответствуют участки пластинчатых элементов, потерявшие контур при местной потере устойчивости.

Используя метод эффективной ширины, как это проиллюстрировано на рисунке 2.4, может быть приблизительно проанализировано поведение гибких пластинчатых элементов при местной потере устойчивости.

При этом подходе фактическое распределение напряжений, действующее на полной ширине элемента  $b$ , изменяется упрощенными эквивалентными напряжениями, действующими на две равные ширины  $b_e/2$ . Средняя часть пластины, которая наиболее подвержена местной потере устойчивости, принимается как не воспринимающая нормальные напряжения, т. е. исключается из работы. Результатом этого является упрощенная модель, в

которой на уменьшенную, редуцированную ширину пластины действуют равномерно распределенные напряжения, равные пределу текучести стали.

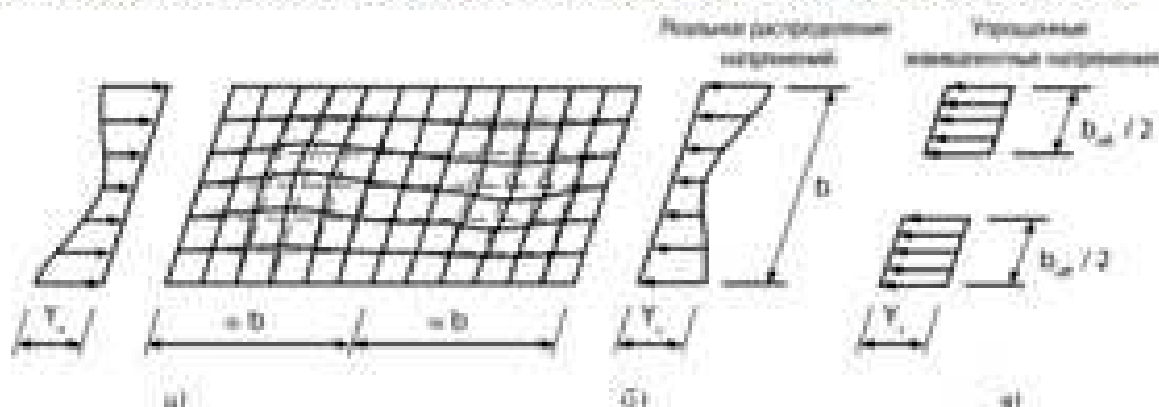


Рисунок 2.4 - Расчетная эффективная ширина

а - равномерно распределенные напряжения, б - редуцированные равномерно распределенные напряжения, в - упрощенные эквивалентные напряжения

Определение эффективной ширины полок и стенок

Для каждого из связанных плоских участков полок и стенок эффективная ширина определяется по формуле

$$b_{eff} = \rho \cdot b, \quad (2.14)$$

где  $b$  - ширина участка

$\rho$  - понижающий коэффициент, учитывающий местную потерю устойчивости пластины.

Понижающий коэффициент  $\rho$  принимает во внимание гибкость пластины ее расчетную схему (условия закрепления в контуре профиля) и распределение напряжений в части сечения.

Для внутренних частей сечения, закрепленных соседними участками профиля, понижающий коэффициент, учитывающий местную потерю устойчивости  $\rho$ , определяется как

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,055(1 + \psi)}{\lambda_p^2} \leq 1 \quad (2.15)$$

Для выступающего элемента - консольного свеса полки:

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,101}{\lambda_p^2} \leq 1 \quad (2.16)$$

где  $\psi$  - отношение напряжений на концах пластины, а  $\lambda_p$  - это гибкость пластины, определяемая по формуле

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{R_{m0}}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_{eff}}{21,4 \cdot t \sqrt{k_{\sigma}}} \quad (2.17)$$

где  $R_{m0}$  - предел текучести,

$\sigma_{cr}$  - критическое напряжение потери устойчивости пластины в упругой стадии,

$b_{eff}$  - соответствующая ширина связанной части сечения,

$t$  - толщина стального листа, т. е. без учета покрытия,

$k_{\sigma}$  - коэффициент, учитывающий характер потери устойчивости в зависимости от отношения напряжений  $\sigma$  по краям пластины и крайних условий закрепления. Значения  $k_{\sigma}$  представлены в таблицах 2.3 и 2.4 с учетом граничных условий для внутренних и выступающих элементов;  
 $\varepsilon$  - отношение  $\sqrt{235/R_{y,20}}$ , где  $R_{y,20}$  в Н/мм<sup>2</sup>.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} \quad (2.18)$$

Существуют предельные значения гибкости, ниже которых местная потеря устойчивости не происходит, и поэтому не влияет на несущую способность сечения. Эти предельные значения соответствуют  $\rho = 1$ .

- для внутренних сжатых элементов

$$\lambda_p \leq 0,673;$$

- для выступающих сжатых элементов

$$\lambda_p \leq 0,748.$$

Таблица 2.3 - Коэффициенты учета потер и устойчивости для сжатых пластин с двухсторонним закреплением по краям [2]

Распределение напряжений в сжатых элементах $\sigma_x$				Эффективная длина $\mu$		
	$\sigma$			$\mu$		
	$\sigma$					
	$\sigma$					
	$\sigma$			$\mu$		
	$\sigma$					
	$\sigma$					
	$\sigma$			$\mu$		
	$\sigma$					
	$\sigma$					
коэффициент учета потер устойчивости $k_{\sigma}$	1	$1 + \rho^2/4$	1/2	$1 + \rho^2/4$	1/2	$1 + \rho^2/4$

Таблица 2.4 - Коэффициенты учета потери устойчивости для сжатых пластин с односторонним закреплением [2]

Граничные условия (рис. 2.3)		Эффективная ширина $\lambda_y$			
		$\lambda_y = b$			
		$\lambda_y = 0.5b$			
Коэффициент учета потери устойчивости $\mu_y$	1	0.5	0.7	1.0	$0.7 + 0.3 \mu_y$
		$\lambda_y = b$			
		$\lambda_y = 0.5b$			
Коэффициент учета потери устойчивости $\mu_y$	1	$0.75b + 0.25l$	0.5	$0.7 + 0.3 \mu_y$	0.5

Если  $\lambda_y$  ниже соответствующего предельного значения, то в расчете эффективной ширины такого элемента  $\rho$  следует принимать равным 1.0. Это не обязательно означает, что все сечение является полностью эффективным, поскольку могут присутствовать другие части сечения, для которых  $\rho < 1.0$ .

#### Определение эффективной ширины краевых отгибов

Формула определения аналогична, что и для определения эффективной ширины полки стэнга

- для одинарного отгиба (рис. 2.5 а):

$$c_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{p,c}; \quad (2.19)$$

$$k_y = 0.5 \text{ если } b_{p,c}/b_p \leq 0.35; \quad (2.20)$$

$$k_y = 0.5 + 0.83 \cdot \sqrt{(b_{p,c}/b_p - 0.35)^2} \text{ если } 0.35 < b_{p,c}/b_p \leq 0.6. \quad (2.21)$$

- для двойного отгиба (рис. 2.5 б):

$$c_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{p,c}; \quad (2.22)$$

$$d_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{p,d}. \quad (2.23)$$

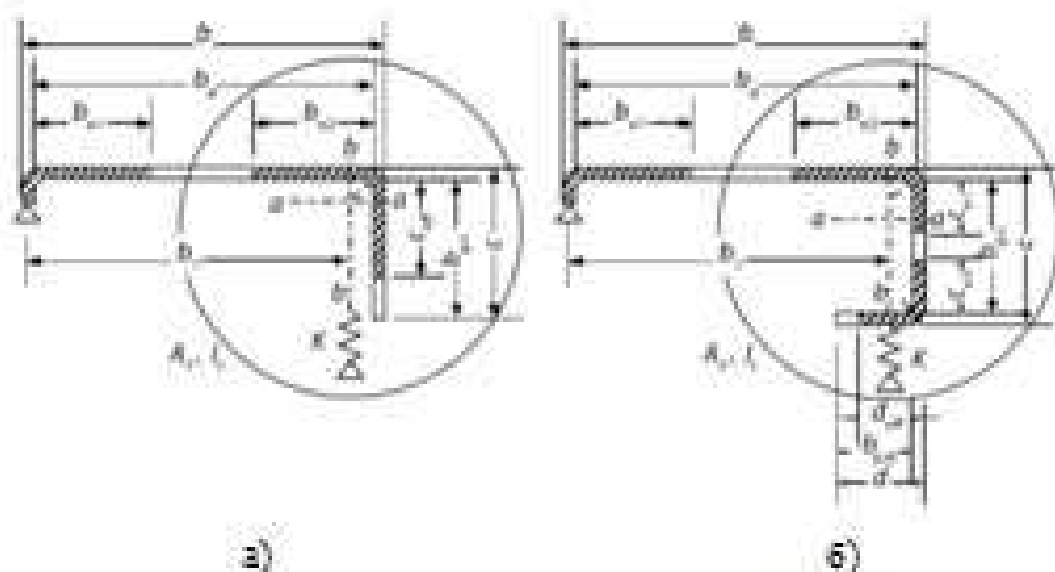


Рисунок 2.5 - Обозначения элементов для определения эффективной ширины проката отгибов:

а - для одностороннего отгиба, б - для двустороннего отгиба.

### Проектирование сечения с элементами жесткости

В связи с тем, что тонкостенные стальные профили подвержены местной потере устойчивости, а также потере устойчивости формы сечения, для проектировщиков и производителей является обычной практикой предусматривать в сечениях элементы жесткости.

Дисторсионная потеря устойчивости происходит тогда, когда концевые или внутренние элементы жесткости не в состоянии препятствовать поперечному смещению узловых точек.

Элементами жесткости в контуре сечения являются односторонние или двойные отгибы в свесах, промежуточные гофры и замковые узлы стоячих фальцев. Как правило, элементы жесткости размещают в зоне полок, но иногда усиливают подшевел и стенки профиля. В основном это выгодно для высоких прогонов в покрытиях и балок перекрытия. Элементы жесткости полок и стенок широко применяются в несущих трапециевидных профнастилах из-за их значительной легкости. Применение элементов жесткости позволяет повысить эффективные характеристики сечений и использовать более тонкий прокат.

В расчете подразумевается, что элемент жесткости ведет себя как стержень, работающий на сжатие с непрерывным распределением. То есть элемент жесткости подвержен продольному сжимающему напряжению. В расчетной схеме распределение элемента представлено упругопластической связью с жесткостью  $K$  (рис. 2.6).



## § 4 Анализ расчета элементов, работающих на изгиб с учетом эффективных характеристик

### 2.4.1 Методика проверки прочности поперечного сечения

1. Расчетная несущая способность поперечного сечения по изгибающему моменту относительно одной из главных осей  $M$ , определяется следующим образом:

- если момент сопротивления эффективного сечения  $W_{\text{эф}}$  менее, чем момент сопротивления полного упругого сечения  $W_{\text{уп}}$

$$\frac{M_x}{M_{\text{эф}} R_F T_c} \leq 1.0 \quad (2.26)$$

- если момент сопротивления эффективного сечения  $W_{\text{эф}}$  равен моменту сопротивления полного упругого сечения  $W_{\text{уп}}$ .

$$\frac{M_x}{M_{\text{уп}} R_F T_c} \leq 1.0 \quad (2.27)$$

При изгибе в двух главных плоскостях

$$\frac{M_x}{M_{\text{эф}} R_F T_c} + \frac{M_y}{M_{\text{эф}} R_F T_c} \leq 1.0 \quad (2.28)$$

Формула применима при соблюдении следующих условий

а) изгибающий момент действует только относительно одной из главных осей поперечного сечения;

б) элемент не подвержен кручению или крутильной, изгибно-крутильной формам потери устойчивости, или потери устойчивости плоской формы изгиба, или потери устойчивости формы сечения;

в) угол  $\phi$  между стеной (рис. 2.7) и полкой более  $60^\circ$ .

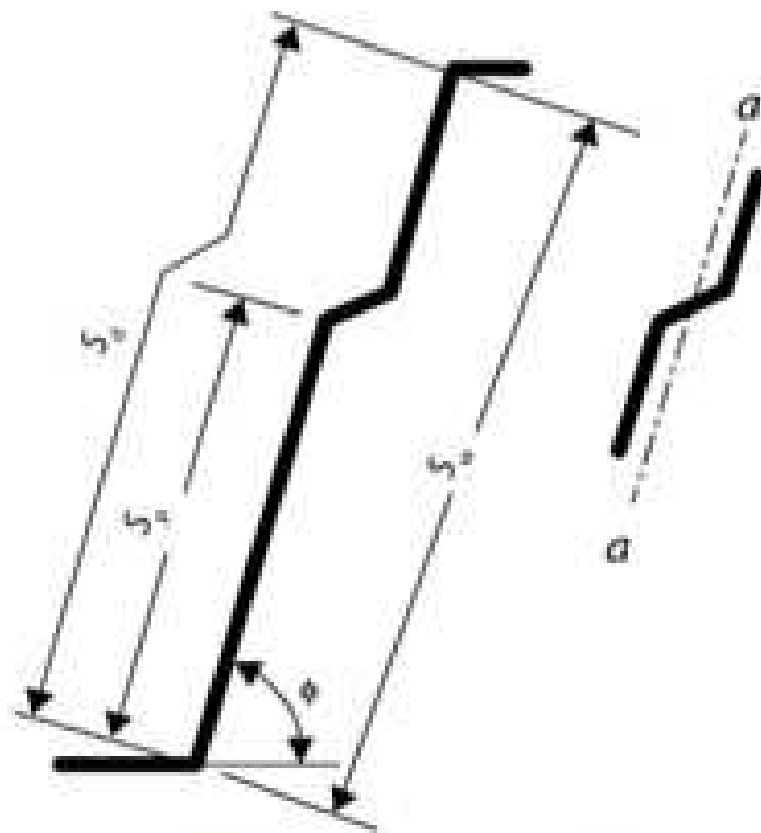


Рисунок 2.7 - Столб с прогибным элементом жесткости

Зависимость несущей способности при изгибе от условной гибкости элемента приведена на рисунке 2.8.

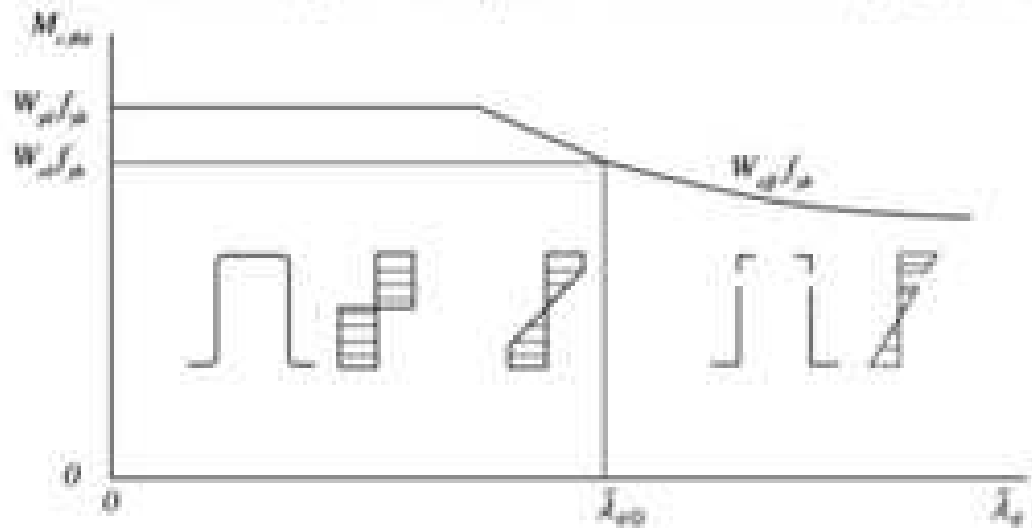


Рисунок 2.8 - Зависимость приведенного изгибающего момента от условной гибкости

## § 4.2 Методика проверки устойчивости изгибаемых балок

Элемент, изгибаемый относительно главной оси и не закрепленный из плоскости действия изгибающего момента, следует проверять на устойчивость плоской формы изгиба по формуле:

$$\frac{M_k}{\chi_{LT} W_{y,eff}} \leq 1,0, \quad (2.29)$$

где  $\chi_{LT}$  - понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба.

Понижающий коэффициент устойчивости  $\chi_{LT}$  определяется по формуле

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ но } \leq 1,0 \quad (2.30)$$

где  $\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$

$\alpha_{LT}$  во всех случаях будет равен 0,34.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff}}{M_{cr}}}, \quad (2.31)$$

где  $M_{cr}$  - критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии.

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{I_y^2 + I_z^2}{L^2} \cdot \left\{ \left[ \left( \frac{C_2}{C_1} \right)^2 - \frac{I_y}{I_z} + \frac{\alpha_c L^2 + 4 I_y}{L^2 + 4 I_y} + (C_3 - \alpha_c - C_4 - \alpha_c)^2 \right]^{0,5} - (C_3 - \alpha_c - C_4 - \alpha_c) \right\}. \quad (2.32)$$

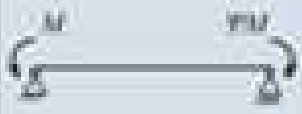









где  $I_y$  - момент инерции при свободном кручении полного сечения;

$I_z$  - секториальный момент инерции полного сечения;

$I_x$  - момент инерции полного сечения относительно малой оси;

$L$  - не закрепленная длина балки.

Таблица 2.5 - Коэффициенты  $C_1$  и  $C_3$  для балок с моментами на опорах [14]

Нагрузки и граничные условия	Эпюра моментов	$l_1$	$C_1$	$C_3$	
				$\nu \leq 0$	$\nu > 0$
	 $\nu=0$	1.0 0.5	1.00 1.00	1.00 1.00	
	 $\nu=0.1$	1.0 0.5	1.04 1.09	1.000 1.017	
	 $\nu=0.2$	1.0 0.5	1.11 1.27	1.000 1.000	
	 $\nu=0.4$	1.0 0.5	1.32 1.60	1.000 1.000	
	 $\nu=0.6$	1.0 0.5	1.77 1.86	1.000 1.000	
	 $\nu=0.8$	1.0 0.5	2.04 2.75	1.000 1.000	0.890 0.690
	 $\nu=1.0$	1.0 0.5	2.75 2.47	1.000 0.950	$1.5+2\nu_y$ $0.77\nu_y$
	 $\nu=1.2$	1.0 0.5	2.60 2.45	1.000 0.850	$0.89\nu_y$ $0.21\nu_y$
	 $\nu=1.4$	1.0 0.5	2.60 2.45	$\frac{\nu_y}{0.57-0.1\nu_y}$ $\frac{\nu_y}{0.57-0.1\nu_y}$	$\frac{\nu_y}{0.57-0.1\nu_y}$ $\frac{\nu_y}{0.57-0.1\nu_y}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• для балок с моментами на опорах <math>C_2 = 0</math></li> <li>• <math>\nu = \frac{M_2}{M_1}</math></li> <li>• где <math>\Delta_y</math> и <math>\Delta_z</math> моменты инерции осей y-y и z-z соответственно, определенные относительно слабой оси сечения (рис. 2.1)</li> <li>• <math>C_3</math> должно быть разделено на 1.25 тогда <math>\frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{\Delta_y}{\Delta_z}} \leq 1.0</math>, но <math>C_3 \leq 1.0</math></li> </ul>					

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  - коэффициенты, которые зависят от условий приложения нагрузок, условий закрепления принимаются по [14] и представлены в таблицах 2.5 и 2.6. В таблицах 2.5 и 2.6 представлены условия закрепления для балок на шарнирных опорах, однако и другие варианты закрепления могут быть рассмотрены с помощью коэффициентов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , описанных ниже.

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  - коэффициенты эффективной длины, зависящие от условий закрепления торцевых сечений. Коэффициент  $\lambda_1$  зависит от поворота торцевых сечений относительно более слабой оси z-z, а коэффициент  $\lambda_2$  характеризует ограничение деформации того же сечения. Значения коэффициентов входят в пределы от 0.5 (ограниченные деформации) до 1.0 (свободные деформации), и равны 0.7 в случае свободных деформаций на одном конце и ограниченных

### §.43 Численные исследования элементов работающих на изгиб с учетом эффективных характеристик

Проведем численные исследования тонкостенных оцинкованных профилей для оценки влияния эффективных характеристик поперечного сечения на несущую способность на примере нескольких вариантов профилей КРАСПАН (углового вертикального профиля, Г-образного и Т-образного).

В качестве исходных данных приняты расчетная схема – двухпролетная шарнирно опертая консольная балка, пролеты по 1 м, консоли по 0,6 м, загружена горизонтальной равномерно-распределенной нагрузкой равной 1 кН/м, поперечные сечения элементов углового профиля представлены на рис. 2.10. Порядок расчета производится в соответствии с алгоритмом расчета приведенным на рисунке 2.9.

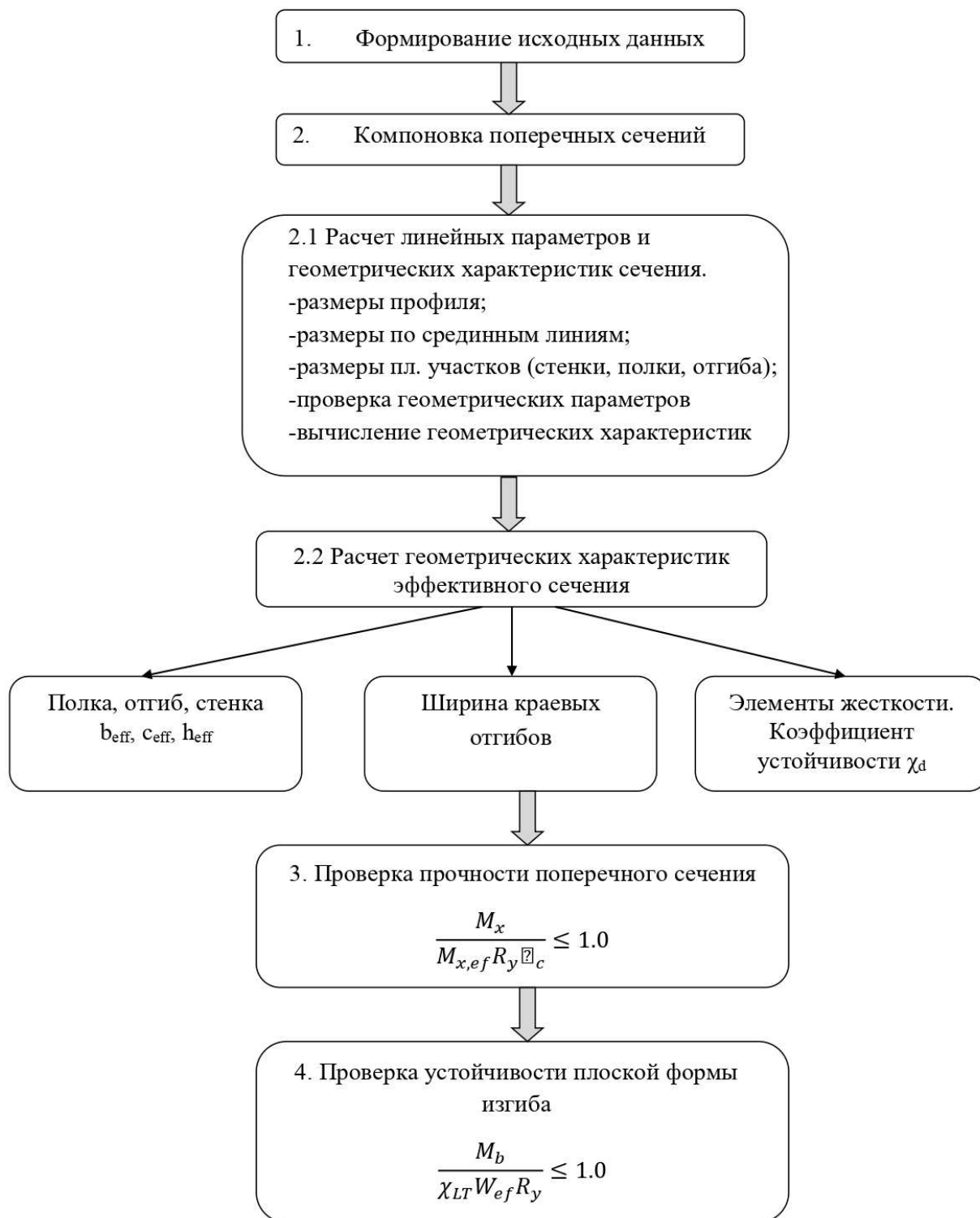


Рисунок 2.9 - Общий алгоритм расчета для профилей

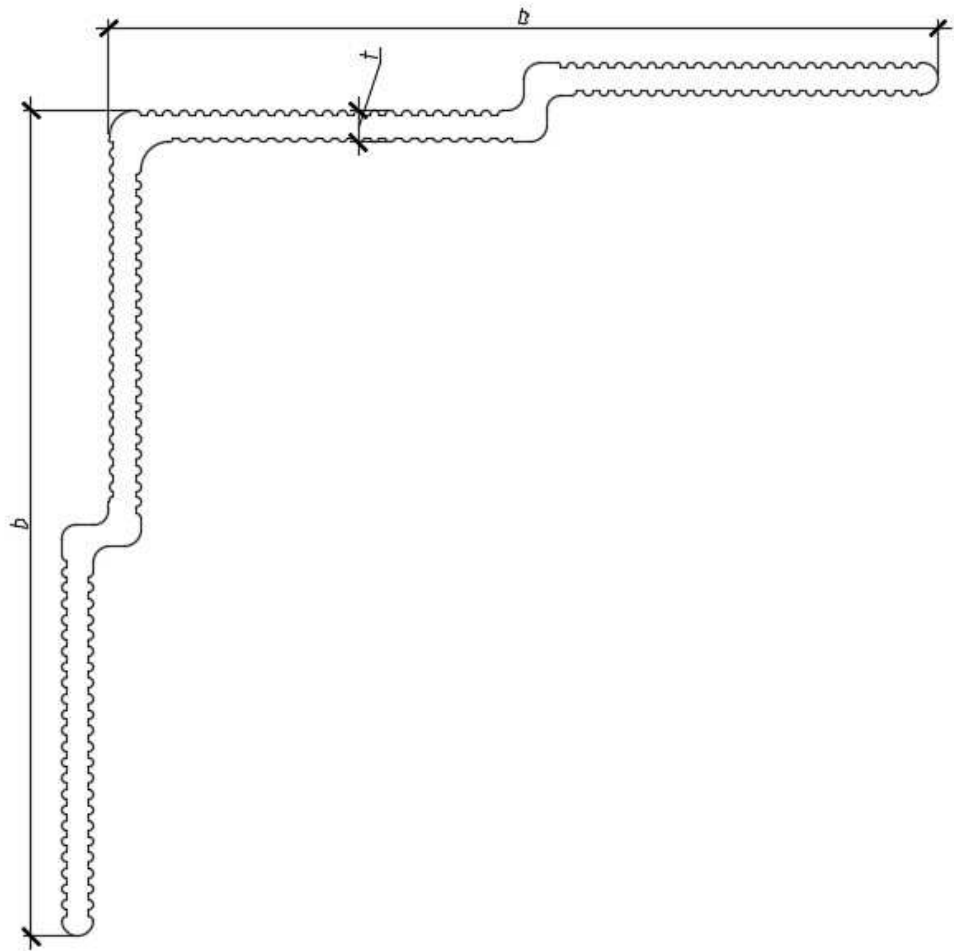


Рисунок 2.10 - Поперечное сечение углового вертикального профиля НК15А

Приведем сечение к форме брутто. Так как СП 260.1325800.2016, рассматривает профили с элементами жесткости на стенках и полках, которые закреплены по двум сторонам, мы можем исключить из расчета элементы жесткости закрепленные с одной стороны. (рисунок 2.11)



Рисунок 2.11 - Поперечное сечение элемента (брутто)

#### Размеры профиля

Ширина полки	$b_1=b_2$	50 мм
Радиус закругления	$r$	1,7 мм
Радиус закругления	$r$	1 мм
Номинальная толщина	$t_{ном}$	2 мм
Толщина стали	$t$	1,96 мм

#### Проверка геометрических параметров

$b/t = 50/1.96 = 34.24$	$< 60$	условие выполняется
-------------------------	--------	---------------------

#### Проверка возможности пренебрежения закруглениями углов

$r/t = 1/1.46 = 2.05$	$< 5$	условие выполняется
$r/b = 1.7/50 = 0.03$	$< 0.10$	условие выполняется
$r/b = 1/50 = 0.02$	$< 0.10$	условие выполняется

#### Геометрические характеристики сечения брутто

Площадь поперечного сечения	$A_{gross}$	204,0
Статический момент относительно оси Y	$S_{y,gross}$	7956,0
Статический момент относительно оси Z	$S_{z,gross}$	2860,0



Момент инерции относительно оси Y	$I_{y,mm^4}$	55330,745
Момент инерции относительно оси Z	$I_{z,mm^4}$	55330,74
Момент инерции при свободном кручении	$I_{x,mm^4}$	236,072
Секториальный момент инерции	$I_{p,mm^4}$	1052,10
Момент сопротивления относительно оси Y	$W_{y,mm^3}$	2406,012
Момент сопротивления относительно оси Z	$W_{z,mm^3}$	1141,728
Центр тяжести по y	$y_c,mm$	13,75
Центр тяжести по z	$z_c,mm$	38,25

### Характеристика эффективного сечения сжатой полки

#### Шаг 1

Эффективная ширина сжатой полки

Для коэффициента напряжения  $\psi=1$  (равномерное сжатие),  $k_c=0,43$

$$\epsilon = \sqrt{235/R_{yk}}$$

$$\epsilon = \sqrt{235/R_{yk}} = \sqrt{235/280} = 0,83$$

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}/t}{29,4 \sqrt{k_c}}$$

$$\lambda_{pl} = \frac{b_{pl}/t}{29,4 \sqrt{k_c}} = \frac{70/1,96}{29,4 \cdot 0,63 = 0,47} = 1,355$$

$$\rho = \frac{\lambda_{pl} - 0,198}{\lambda_{pl}^2} = \frac{1,355 - 0,198}{1,355^2} = 0,635, \rho < 1$$

Эффективная ширина определяется следующим образом:

$$b_{ed} = b_{c,ed} = \rho b_{pl} = 0,635 \cdot 50 = 31,77$$

Геометрические характеристики являса эффективного сечения:

$$A_{ef} = t \cdot (b_{ef1} + b_{ef2})$$

$$A_{ef} = 127,1 \text{ cm}^2$$

Положение нейтральной оси относительно сжатой полки:

$$z_c = 0.918 \text{ м}^2$$

$$z_s = 2.459 \text{ м}^2$$

$$I_{yT,y} = 14701.06 \text{ мм}^4$$

$$W_{yT,y,c} = \frac{I_{yT,y}}{z_c} = 16014.23 \text{ мм}^3$$

$$W_{yT,y,s} = \frac{I_{yT,y}}{z_s} = 5978.47 \text{ мм}^3$$

### Проверка прочности поперечного сечения

Расчетное значение изгибающего момента  $M_{yT}$  для любого сечения должно удовлетворять условию:

$$\frac{M_{yT}}{W_{yT,y} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1.0$$

$$\frac{0.07}{5978.47 \cdot 230 \cdot 10^{-6}} = 0.05 \text{ кН}$$

$$0.05 \leq 1.0$$

Несущая способность обеспечена.

### Проверка устойчивости плоской формы изгиба

Расчетное значение несущей способности по устойчивости плоской формы изгиба для балок, не раскрепленных из плоскости действия изгибающего момента, следует принимать равным:

$$\frac{M_b}{\chi_{LT} W_{yT} R_y} \leq 1.0; \quad (1.1)$$

где  $\chi_{LT}$  — понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба.

Для изгибаемых элементов постоянного поперечного сечения значение

$\chi_{LT} \leq 1.0$  при условной гибкости  $\lambda_{LT}$  определяют по формуле:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}}$$

$$\text{где } \phi_{LT} = [1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - 0.2) + \lambda_{LT}^2]$$

здесь  $\alpha_{LT}$  – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{ef} R_y}{M_{cr}}}$$

где  $M_{cr}$  – критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии

$C_1 = 1.127$  (равномерно загруженная балка)

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L)^2}$$

$$\cdot \left( \left( \left( \frac{k_x}{k_y} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_{yy}} + \frac{(k_y \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} + (C_2 \cdot y_n - C_3 \cdot y_l)^2 \right)^{0.5} - (C_2 \cdot y_n - C_3 \cdot y_l) \right) = 190.1 \text{ кНм}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{ef} R_y}{M_{cr}}} = 0.15$$

$$\phi_{LT} = 0.5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$= 0.5 \cdot [1 + 0.34 \cdot (0.15 - 0.2) + 0.15^2] = 0.5$$

$$\alpha_{LT} = 0.34$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0.5 + \sqrt{0.5^2 - 0.15^2}} = 1.01$$

$$\frac{M_b}{\chi_{LT} W_{ef} R_y} = \frac{4.5}{4.67} = 0.99 < 1.0$$

Устойчивость обеспечена

Далее выполним численные исследования вариантов профилей Г-образных, Т-образных, Угловых сечений, результаты исследования сведены в таблицу 2.8. Также, выполним расчет нормальных напряжений, с учетом эффективных характеристик и без, с целью выявления закономерностей.

Объектами данного исследования являются:

Таблица 2.7 Объекты исследования

Профиль		Размеры (мм)	Толщина (мм)
НК 15Ц	Угловой	51x51	1,2
НК 47Ц	Угловой	27,5x27,5	1,2
НК 16Ц	Г-образный	40,7x28,2	1,2
НК 28Ц	Г-образный	71x32	1,2
НК 16А	Г-образный	52x32	2
НК 28А	Г-образный	75x29	2
НК 14Ц	Т-образный	101x32	1,2
НК 46Ц	Т-образный	56x28	1,2
НК 46А	Т-образный	62x32	2
НК 14А	Т-образный	102,8x27	2

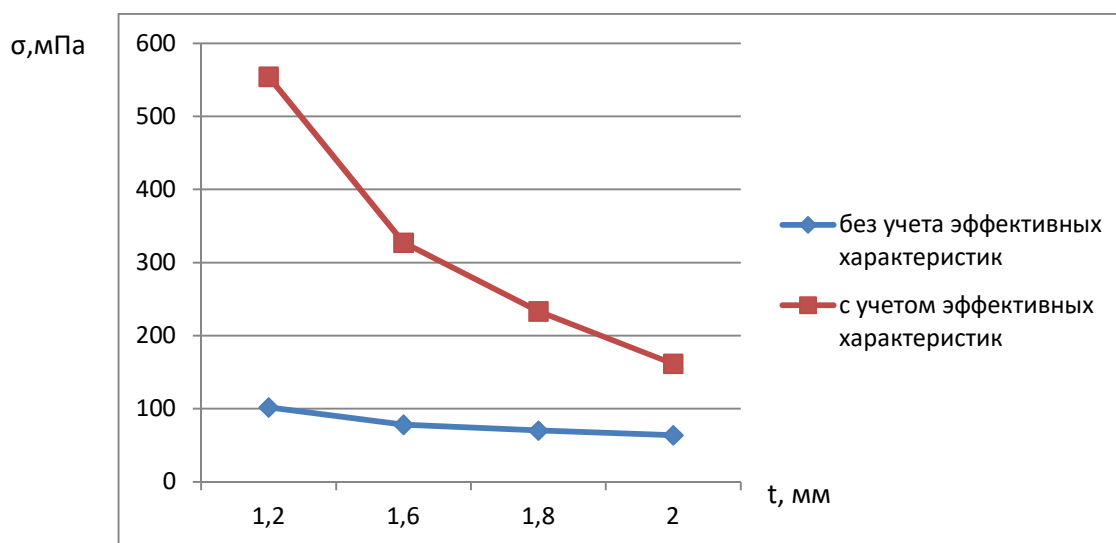
Таблица 2.8 - Результаты численного исследования профилей КРАСПАН(угловых, Г-образных, и Т-образных), работающих на изгиб

ПРОФИЛЬ	$A, \text{mm}^2$	$S, \text{mm}^3$	$S_y, \text{mm}^3$	$x_c, \text{mm}$	$y_c, \text{mm}$	$I_x, \text{mm}^4$	$I_y, \text{mm}^4$	$W_x, \text{mm}^3$	$W_y, \text{mm}^3$	$A_{\text{ср}}, \text{mm}^2$	$W_{\text{ср},x}, \text{mm}^3$	$W_{\text{ср},y}, \text{mm}^3$	$I_{\text{ср}}, \text{mm}^4$	$\frac{M_x}{W_{\text{ср},x} \cdot R_y \cdot \gamma_c}$	$\frac{M_y}{\chi_{117} \cdot W_{\text{ср},y} \cdot R_x}$
НК 15 Ц	121	4626.7 2	1615.68	13.20	37.8	32018.7 1	32018.7 1	1420	686.9	48.08	337.89	126.3	1841.56	2.42	2.4
НК 14 Ц	189.6	7847.7	916.89	50.5	5.9	14286.5	103062. 9	601.7	2041.0	103.65	8944.27	920.54	31215.5 3	0.33	0.4
НК 16 Ц	81.24	2292.5 9	456.56	5.62	28.22	5846.63	14343.5	216.2	604.4	55.76	218.12	125.67	1897.67	2.4	2.4
НК 46 Ц	133.92	2822.4	2126	21.1	28	11344.1 3	17593.6 2	542.8	628.4	89.75	242.0	287.0	3444.13	1	1
НК 47 Ц	64.56	1331.2 2	443.52	6.72	20.17	4879.05	4879.05	400.6	188.9	44.22	281.02	106.14	1419.18	2.8	2.5
НК 28 Ц	122.16	3082.5 8	672.384	5.44	24.94	9531.1	67192.9	2324.23	557.01	74.17	837.11	202.04	2277.84	1.5	1.4
НК 16 А	164.0	5903.5 2	982.8	5.85	35.14	14275.1 5	47235.1 5	2139.89	664.64	151.26	1767.66	570.28	12002.1 6	0.5	0.6
НК 28 А	204.0	9809.2 8	1004.64	4.83	47.16	11678.6 6	123228. 6	4005.9	805.4	203.06	2441.75	259.36	12135.5	1	1
НК 46 А	184	5828.0	1167.48	6.21	31.0	14892.6 3	39741.3 3	1281.97	2395.31	170.18	2074.92	404.94	12553.3 5	0.7	0.8
НК 14 А	273.1	13343. 44	1188.96	4.58	51.4	14853.3 3	181097. 5	3523.2	3240.3	268.29	4024.29	283.45	14286.2 6	1	1

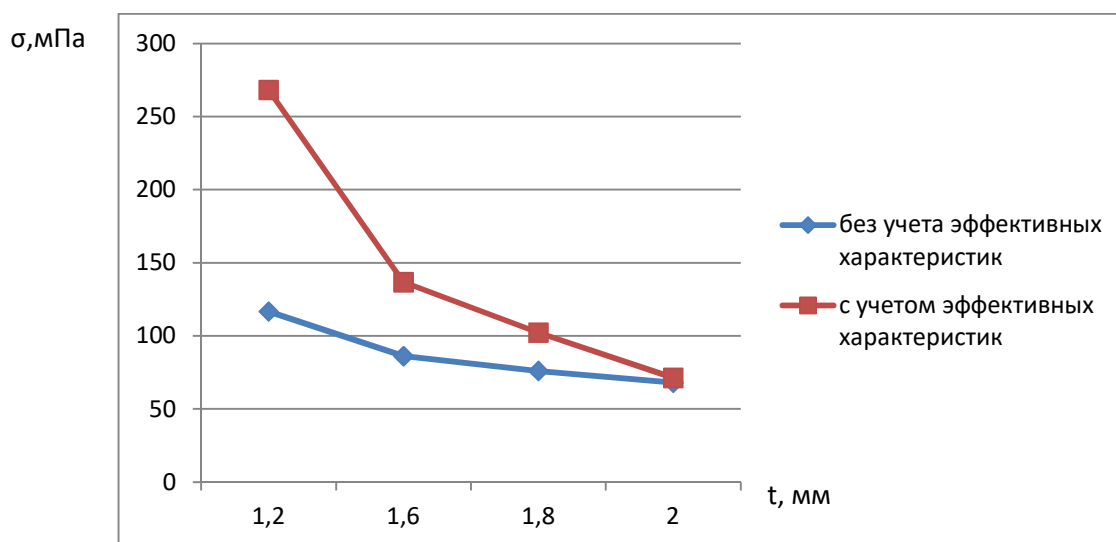
Проведем численные исследования тонкостенных профилей, с целью выявления и оценки зависимости между эффективными характеристиками сечения и несущей способности с изменением толщины. Учитывая запас прочности примерно от 40-50%, можно оценить зависимость поперечного сечения и несущей способности с помощью вычисления нормальных напряжений, при изменении толщины профиля.

Результаты расчета приведены на диаграммах

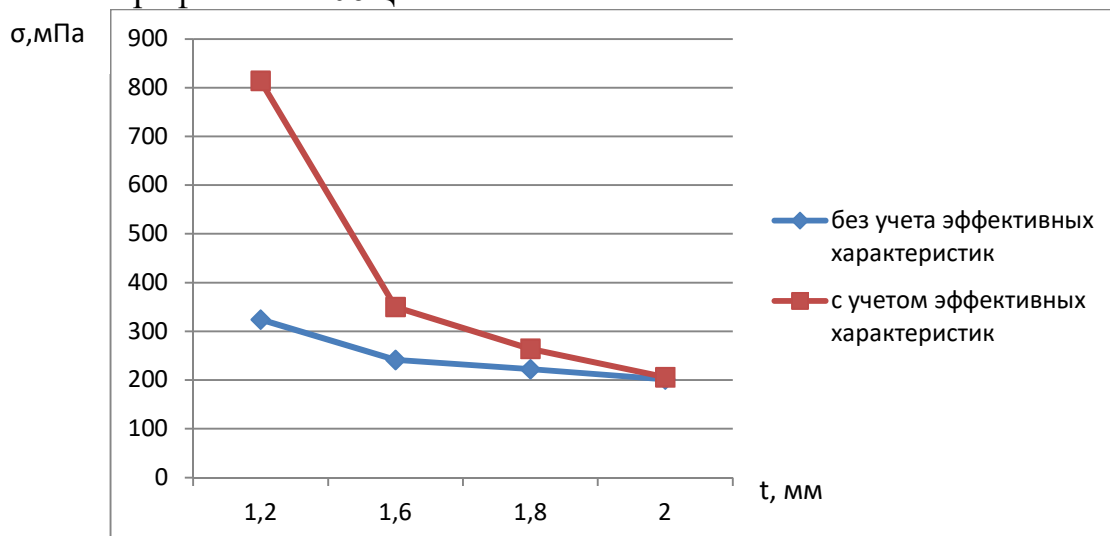
Профиль НК 05Ц:



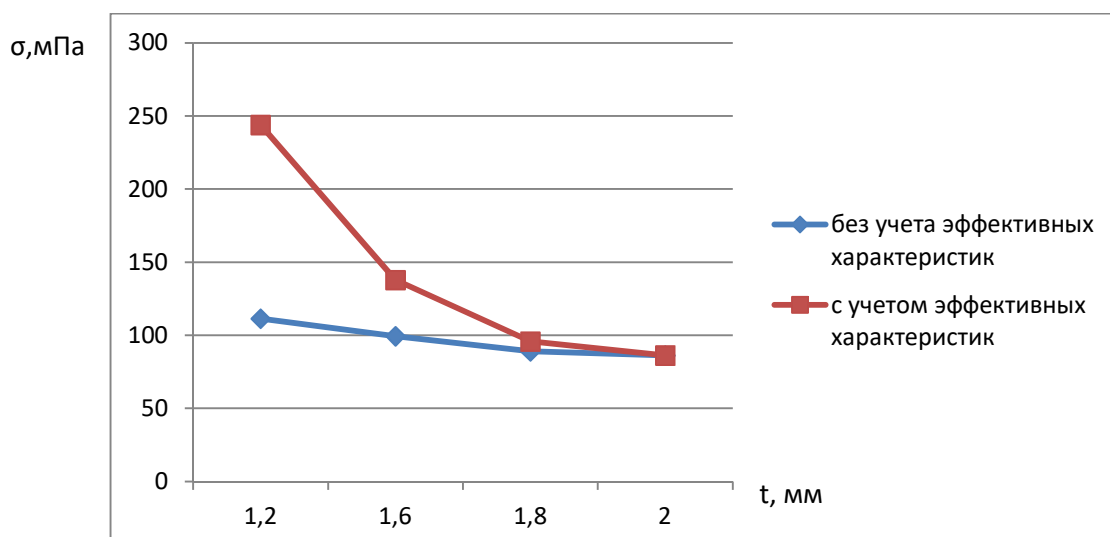
Профиль НК 04Ц:



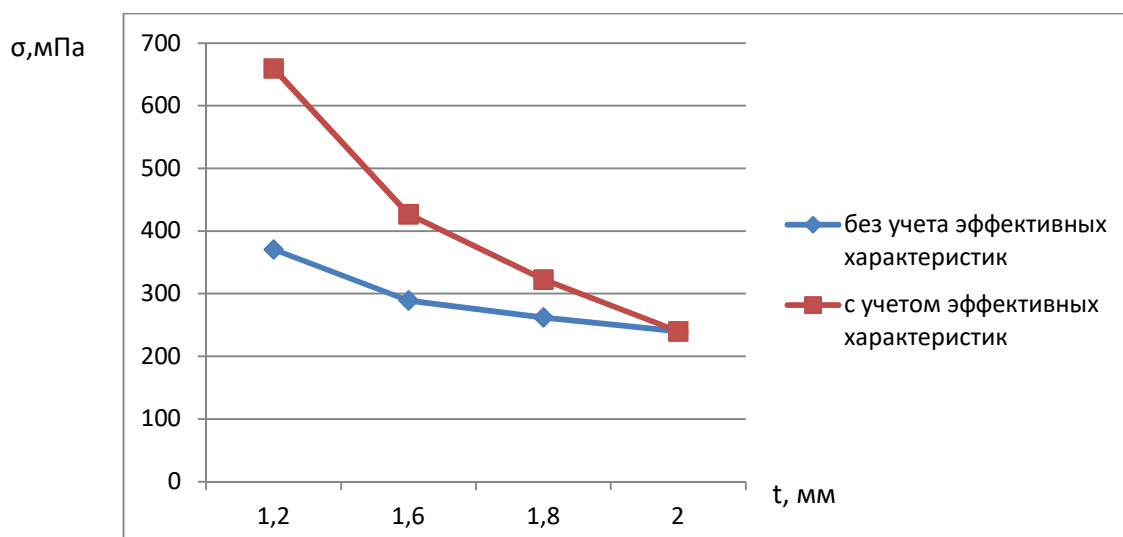
Профиль НК 06Ц:



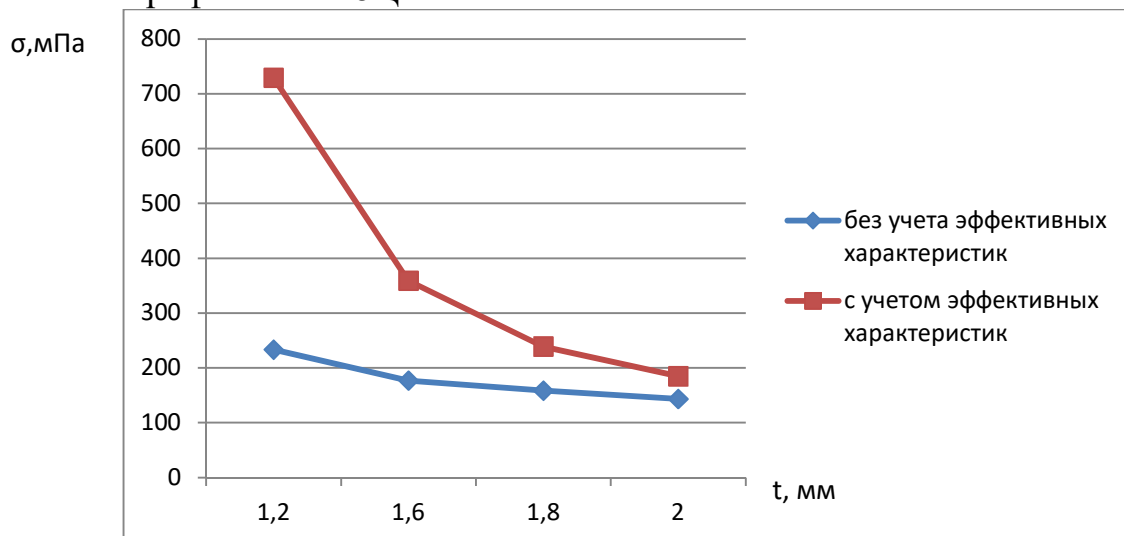
Профиль НК 46Ц:



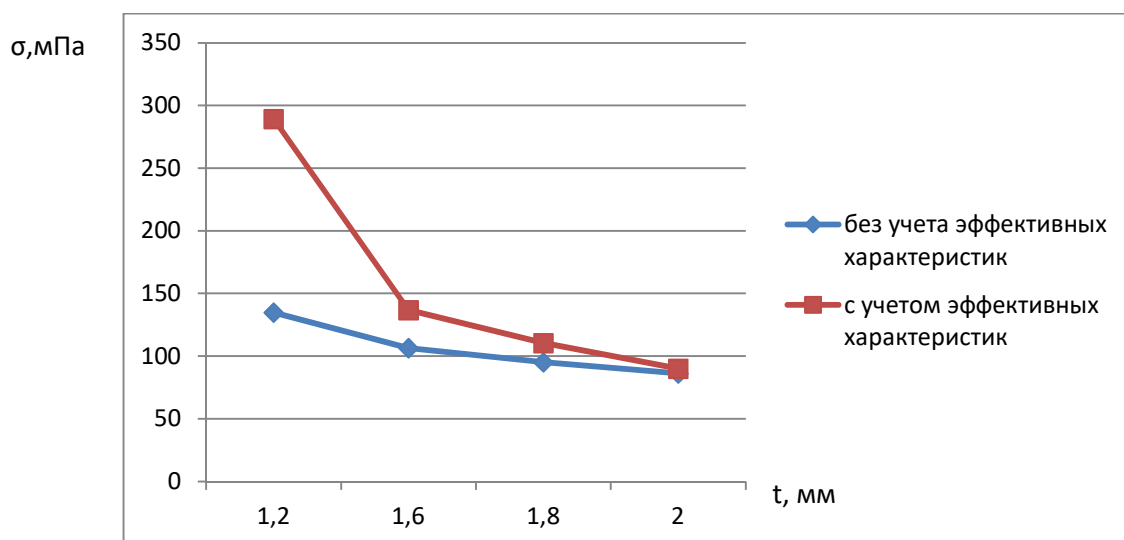
Профиль НК 47Ц:



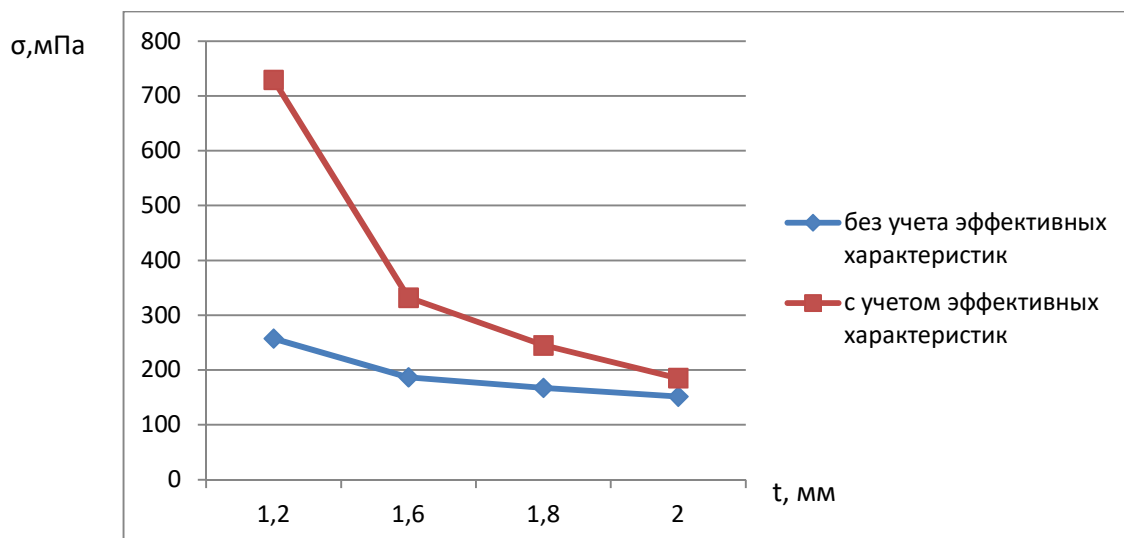
Профиль НК 28Ц:



Профиль НК 04А:

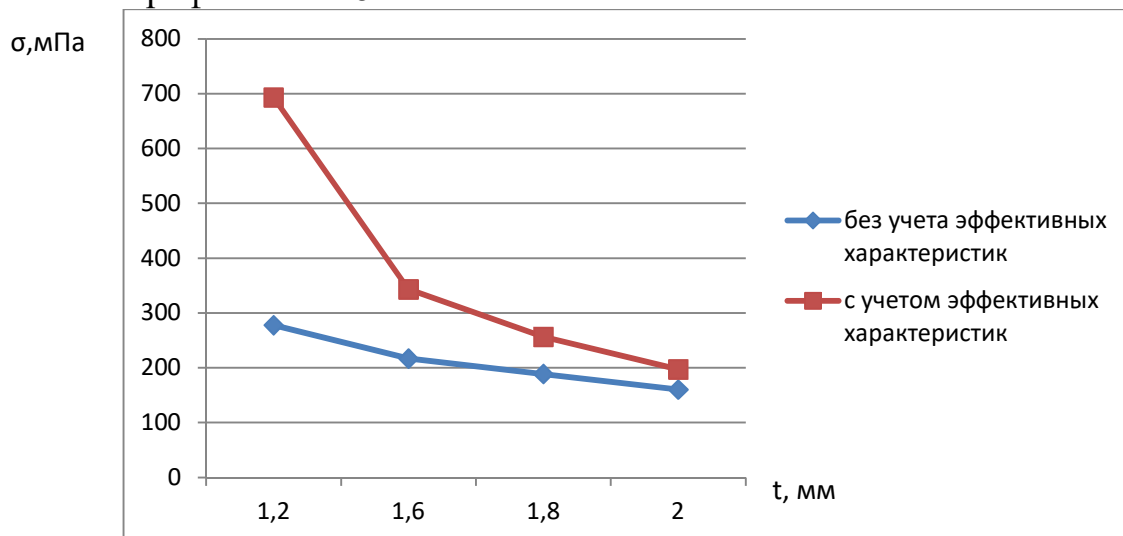


Профиль НК 06А:

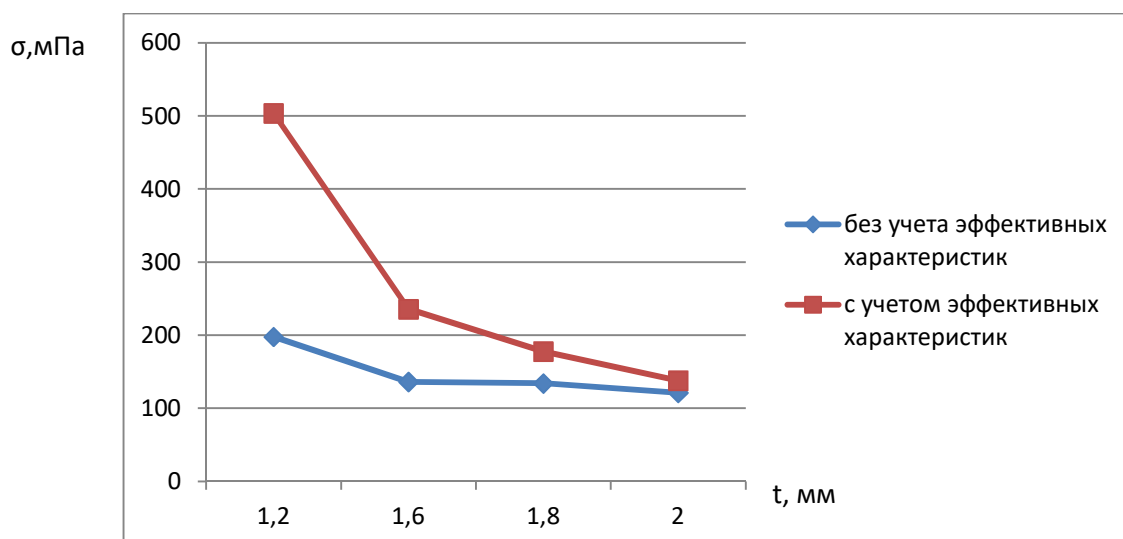




Профиль НК 28А:



Профиль НК 46А:



Рассчитаем расхождение напряжений в процентном соотношении при учете редуцированных характеристик и без. Результаты расчета приведены в таблице 2 9

Таблица 2 9 - Результаты анализа нормальных и касательных напряжения с учетом эффективных характеристик и без

Профиль	Толщина (мм)	Разница нормальных напряжений при учете редуцированных характеристик и без (%)
НК 05 Ц	t= 0 2 мм	444%
	t= 0 6 мм	3 08,2%
	t= 0 8 мм	232,3%
	t=2 мм	053%
НК 04 Ц	t= 0 2 мм	030%
	t= 0 6 мм	58,8%
	t= 0 8 мм	34,45%
	t=2 мм	5%
НК 06 Ц	t= 0 2 мм	05 0%
	t= 0 6 мм	45%
	t= 0 8 мм	08,8%
	t=2 мм	2%
НК 46 Ц	t= 0 2 мм	0 09%
	t= 0 6 мм	38,6%
	t= 0 8 мм	7,66%
	t=2 мм	0
НК47 Ц	t= 0 2 мм	78%
	t= 0 6 мм	47,6%
	t= 0 8 мм	23,04%
	t=2 мм	0
НК 28 Ц	t= 0 2 мм	2 03%
	t= 0 6 мм	003, 0%

	t= 0 8 мм	50,8%
	t=2 мм	29%
HK 06 A	t= 0 2 мм	083%
	t= 0 6 мм	77,7%
	t= 0 8 мм	46, 05%
	t=2 мм	22%
HK 28 A	t= 0 2 мм	050%
	t= 0 6 мм	58,3%
	t= 0 8 мм	35,9%
	t=2 мм	23%
HK 46 A	t= 0 2 мм	055%
	t= 0 6 мм	73, 0%
	t= 0 8 мм	32,5%
	t=2 мм	04%
HK 04 A	t= 0 2 мм	0 04%
	t= 0 6 мм	28,5%
	t= 0 8 мм	06, 0%
	t=2 мм	4%

Проанализировав результаты расчета угловых, Г-образных и Т образных профилей, работающих на изгиб, можно сделать вывод, о зависимости несущей способности от его высоты и толщины профиля. В данном разделе были рассмотрены профили толщиной в пределах 2 мм.

Наличие у профиля ребер жесткости или гофрированной поверхности увеличивает запас прочности профиля в несколько раз.

Эффективные характеристики поперечного сечения профилей имеют существенное влияние на несущую способность.

Расхождение геометрических характеристик поперечного сечения профилей с учетом редуцирования и без отличаются:

- площадь примерно на 20-70%,
- момент сопротивления поперечного сечения примерно на 40 %,
- момент инерции примерно на 30 %

Запас прочности профилей составляет 45-50 % без учета, и 00- 05% с учетом эффективных характеристик. Разница запаса прочности при изменении толщины 50 %.

При расчете тонкостенных профилей необходимо учитывать эффективные характеристики поперечного сечения. Перед началом расчета все профили необходимо проверять на допустимое соотношение толщины к длине, так как по теоретическим данным не все тонкостенные профили могут подвергаться потере местной устойчивости.

## 2.5 Анализ расчета элементов, работающих на сжатие с учетом эффективных характеристик

### 2.5.1 Методика расчета элементов на осевое сжатие [2]

Расчетное значение сжимающего усилия  $N$  для любого сечения должно удовлетворять условию:

$$\frac{N}{\Phi A_{ef} \sigma_{fc}} \leq 1,0 \quad (2.33)$$

Внутреннее усилие в элементе следует принимать приложенным в центре тяжести полного поперечного сечения. Эта предпосылка приближенная, но может быть использована без последующего анализа. Последующий анализ может установить более реальное положение внутреннего усилия. Расчетная несущая способность определена при действии осевой силы в центре тяжести эффективного поперечного сечения. Если он не совпадает с центром тяжести полного сечения, то должен быть учтен эксцентриситет  $e$ , относительно центральной оси (рисунок 2.12). Если учет этого эксцентриситета приводит к более благоприятному результату при определении напряжений, то он может не учитываться, если расчет выполняется по предельной деформации и в сечении отсутствуют сжимающие напряжения.



Рисунок 2.12 - Эффективное поперечное сечение при сжатии

### 2.5.2 Методика проверки устойчивости сжатых элементов постоянного сечения [2]

Сжатый элемент следует проверять на устойчивость по следующей зависимости:

$$\frac{N}{\Phi A_{ef} \sigma_{fc}} \leq 1,0 \quad (2.34)$$

где  $N$  - расчетное значение сжимающей силы,

### 2 5 3 Численные исследования элементов, работающих на сжатие, с учетом эффективных характеристик

Проведем численные исследования тонкостенных оцинкованных профилей для анализа оценки влияния эффективных характеристик поперечного сечения на несущую способность на примере нескольких вариантов профилей КРАСПАН (углового вертикального профиля, Г-образного и Т-образного) В качестве исходных данных приняты: расчетная схема – двухпролетная, шарнирно опертая консольная балка, пролеты по 0 м, консоли по 0,6 м, загружена вертикальной равномерно-распределенной нагрузкой равной 0 кН/м, поперечные сечения элементов Г-образного профиля представлены на рис 2 04, Порядок расчета производится в соответствии с алгоритмом расчета приведенным на рисунке 2 03

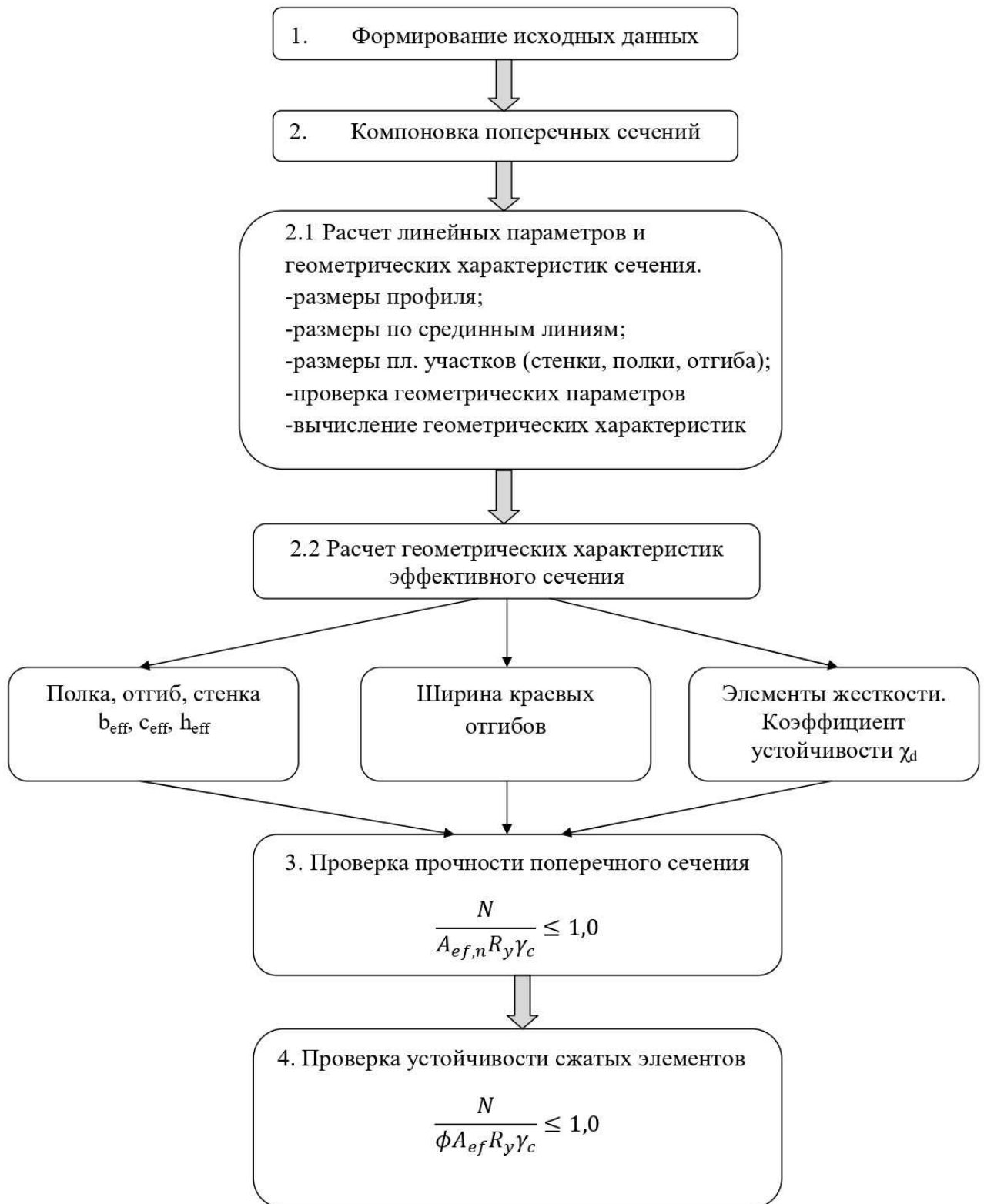


Рисунок 2 03 - Алгоритм расчета элементов, работающих на сжатие

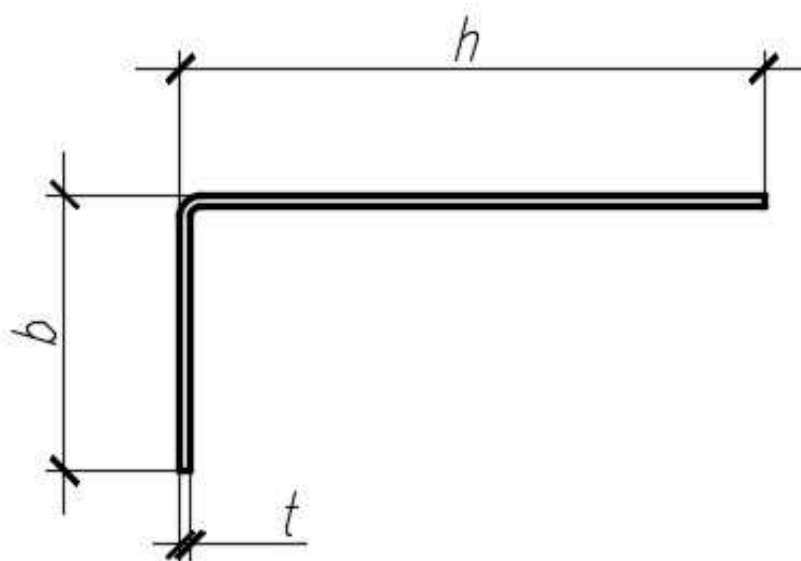


Рисунок 2 04 - Поперечное сечение Г-образного профиля НК 28Ц

### Размеры профиля

Высота полки	h	70 мм
Ширина полки	b	32 мм
Радиус закругления	r	0,2 мм
Номинальная толщина	$t_{\text{ном}}$	0,2 мм
Толщина стали	t	0,06 мм

### Проверка геометрических параметров

$h/t = 70 / 0,06 = 60,20$	$< 500$	условие выполняется
$b/t = 32 / 0,06 = 27,58$	$< 60$	условие выполняется

### Проверка возможности пренебрежения закруглениями углов

$r/t = 0,2 / 0,06 = 0,03$	$< 5$	условие выполняется
---------------------------	-------	---------------------



$r/b = 0,2/32 = 0,03$	$< 0,00$	<b>условие выполняется</b>
-----------------------	----------	----------------------------

### Геометрические характеристики сечения брутто

Площадь поперечного сечения	$A, \text{mm}^2$	022,06
Статический момент относительно оси Y	$S_y, \text{mm}^3$	3082,58
Статический момент относительно оси Z	$S_z, \text{mm}^3$	672,384
Момент инерции относительно оси Y	$I_y, \text{mm}^4$	9530,00
Момент инерции относительно оси Z	$I_z, \text{mm}^4$	67092,90
Момент инерции при свободном кручении	$I_t, \text{mm}^4$	50,099
Секториальный момент инерции	$I_w, \text{mm}^6$	$79 \cdot 10^7$
Момент сопротивления относительно оси Y	$W_y, \text{mm}^3$	2324,23
Момент сопротивления относительно оси Z	$W_z, \text{mm}^3$	557,00
Центр тяжести по y	$y_c, \text{mm}$	29,94
Центр тяжести по z	$z_c, \text{mm}$	5,44

#### Шаг 0 Эффективная ширина полок

Для соотношения напряжений  $\psi = 0$  (равномерное сжатие),  $k_\sigma = 0,43$

$$\varepsilon = \sqrt{235/R_y};$$

$$\lambda_p = \frac{b_p/t}{284 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{32/0,06}{284 \cdot \sqrt{235/280} \cdot \sqrt{0,43}} = 0,06$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,088}{\lambda_p^2} = \frac{0,06 - 0,088}{0,06^2} = 0,722 \leq 0,0;$$

$$b_{ef} = \rho \cdot b_{p0} = 0,722 \cdot 32 = 23,004 \text{ мм}$$

#### Шаг 2 Эффективная ширина стенки

Для соотношения напряжений  $\psi=0$  (равномерное сжатие),  $k_\sigma = 4$   
 $\varepsilon = \sqrt{235/R_y}$ ;

Условная гибкость части стенки примыкающей к полке:

$$\lambda_p = \frac{h/t}{28.4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{70/0.06}{28.4 \cdot \sqrt{235/280} \cdot \sqrt{4}} = 0.07;$$

$$\rho = \frac{\lambda_p^{-0.088}}{\lambda_p^2} = \frac{0.07^{-0.088}}{0.07^2} = 0.70 \leq 1.0;$$

$$h_{ef} = \rho \cdot h_{p0} = 0.70 \cdot 70 = 50.40 \text{ мм}$$

$$A_{ef} = t \cdot [h_{ef} + b_{ef}] = 0.06 \cdot [23.004 + 50.40] = 73.50 \text{ мм}^2$$

### Проверка прочности поперечного сечения

Расчетное значение сжимающего усилия  $N$  для любого сечения должно удовлетворять условию:

$$\frac{N}{A_{ef,n} R_y \gamma_c} \leq 1.0$$

$$\frac{N}{A_{ef,n} R_y \gamma_c} = \frac{0.02}{73.50 \cdot 280 \cdot 1.0} = 0.97 < 1.0$$

Несущая способность обеспечена

### Проверка устойчивости сжатых элементов постоянного сечения

Сжатый элемент следует проверять на устойчивость по следующей зависимости:

$$\frac{N}{\phi A_{ef,n} R_y \gamma_c} \leq 1.0$$

$$\frac{N}{\phi A_{ef,n} R_y \gamma_c} = \frac{0.02}{0.956 \cdot 73.50 \cdot 280 \cdot 1.0} \approx 0 = 1.0$$

Устойчивость обеспечена

Проведем численные исследования вариантов профилей Г-образных, Т-образных, угловых сечений, результаты исследования сведены в таблицу 2.00  
 Объекты исследования приведены в таблице 2.7

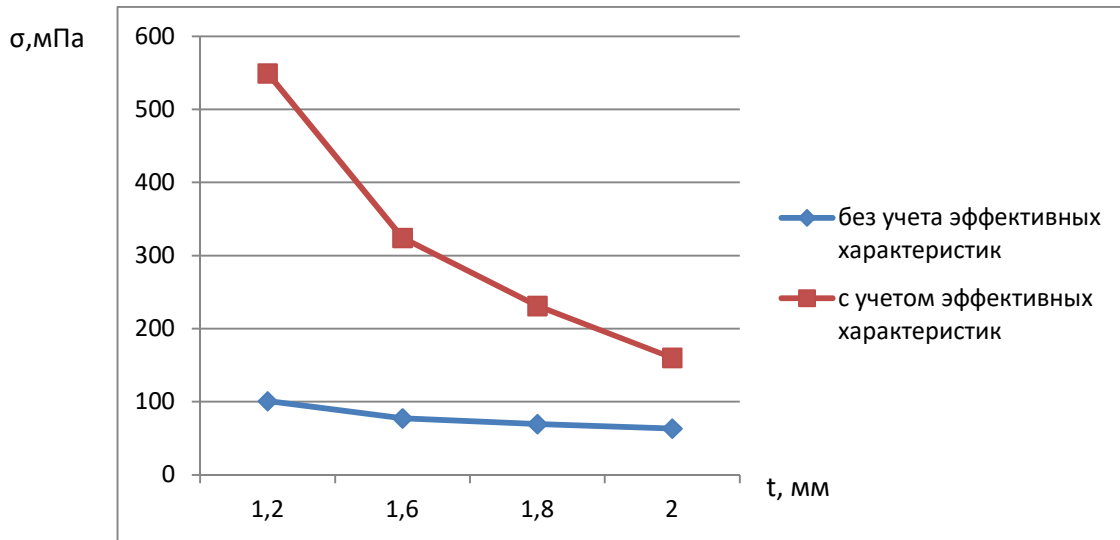
Таблица 2.10 - Результаты численного исследования профилей КРАСПАН(угловых, Г-образных, и Т-образных), работающих

ПРОФИЛЬ	A,mm <sup>2</sup>	S <sub>0</sub> ,mm <sup>2</sup>	S <sub>1</sub> ,mm <sup>2</sup>	x <sub>0</sub> ,mm	y <sub>0</sub> ,mm	I <sub>0</sub> ,mm <sup>4</sup>	I <sub>1</sub> ,mm <sup>4</sup>	W <sub>0</sub> ,mm <sup>3</sup>	W <sub>1</sub> ,mm <sup>3</sup>	A <sub>ср</sub> ,mm <sup>2</sup>	W <sub>ср0</sub> ,mm <sup>3</sup>	W <sub>ср1</sub> ,mm <sup>3</sup>	L <sub>ср0</sub> ,mm <sup>4</sup>	$\frac{N}{R_{ср,0}R_yK_c}$	$\frac{N}{\phi I_{ср,0}R_yK_c}$
НК 15 Ц	121	4626,7	1615,68	13,20	37,8	32018,7	32018,7	1420	686,9	47,65	334,88	125,1759	1825,17	1,5	1,6
НК 14 Ц	189,6	7847,7	916,89	50,5	5,9	14286,5	103063	601,7	2041,0	102,72	8864,67	912,3472	30937,7	0,7	0,8
НК 16 Ц	81,24	2292,5	456,56	5,62	28,22	5846,63	14343,5	216,2	604,4	55,26	216,18	124,5515	1880,78	1,29	1,35
НК 46 Ц	133,92	2821,4	2126	21,1	28	11344,1	17593,6	542,8	628,4	88,95	239,85	284,4457	3413,47	0,8	0,84
НК 47 Ц	64,56	1331,2	443,52	6,72	20,17	4879,05	4879,05	400,6	188,9	43,82	278,52	105,1954	1406,54	1,63	1,7
НК 14 А	273,1	13343,4	1188,96	4,58	51,4	14853,3	181097,5	3523,2	3240,3	265,9	3988,47	280,9273	14159,1	0,26	0,28
НК 16 А	164,0	5903,5	982,8	5,85	35,14	14275,1	47235,1	2139,89	664,64	149,91	1751,93	565,2045	11895,3	0,47	0,5
НК 28 А	204,0	9809,2	1004,64	4,83	47,16	11678,6	123228,6	4005,9	805,4	201,25	2420,02	257,0517	12027,4	0,35	0,37
НК 46 А	184	5828,0	1167,48	6,21	31,0	14892,6	39741,3	1281,97	2395,31	168,66	2056,45	401,336	12441,6	0,42	0,44
НК 28 Ц	122,16	3082,6	672,384	5,44	24,94	9531,1	67192,9	2324,23	557,01	73,51	829,66	200,2418	2257,56	1	1

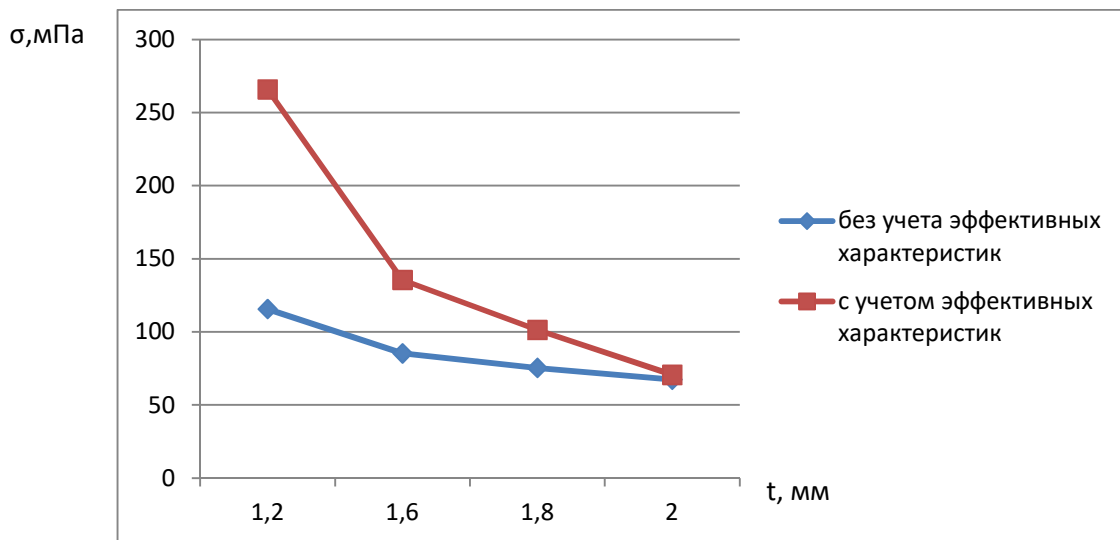
Проведем численные исследования тонкостенных профилей, с целью выявления и оценки зависимости между эффективными характеристиками сечения и несущей способностью с изменением толщины. Учитывая запас прочности примерно от 35-45%, можно оценить зависимость поперечного сечения и несущей способности с помощью вычисления нормальных напряжений, при изменении толщины профиля.

Результаты расчета приведены на диаграммах

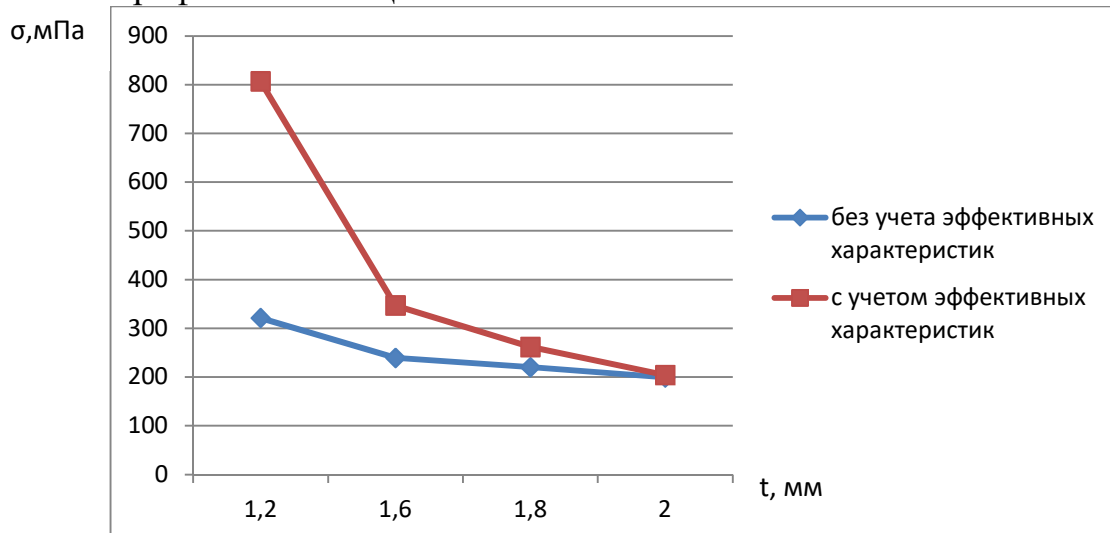
Профиль НК 05Ц:



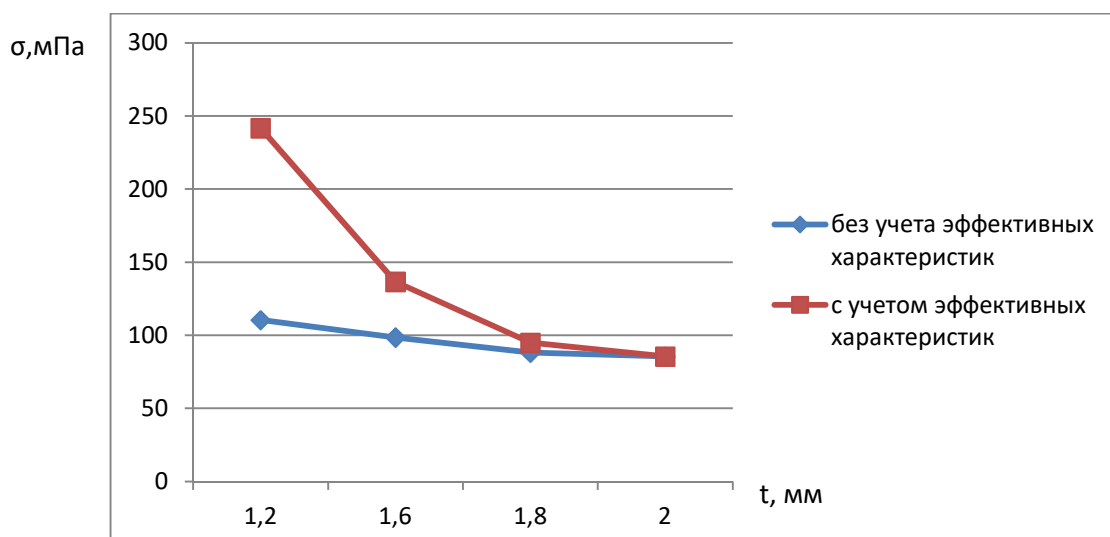
Профиль НК 04Ц:



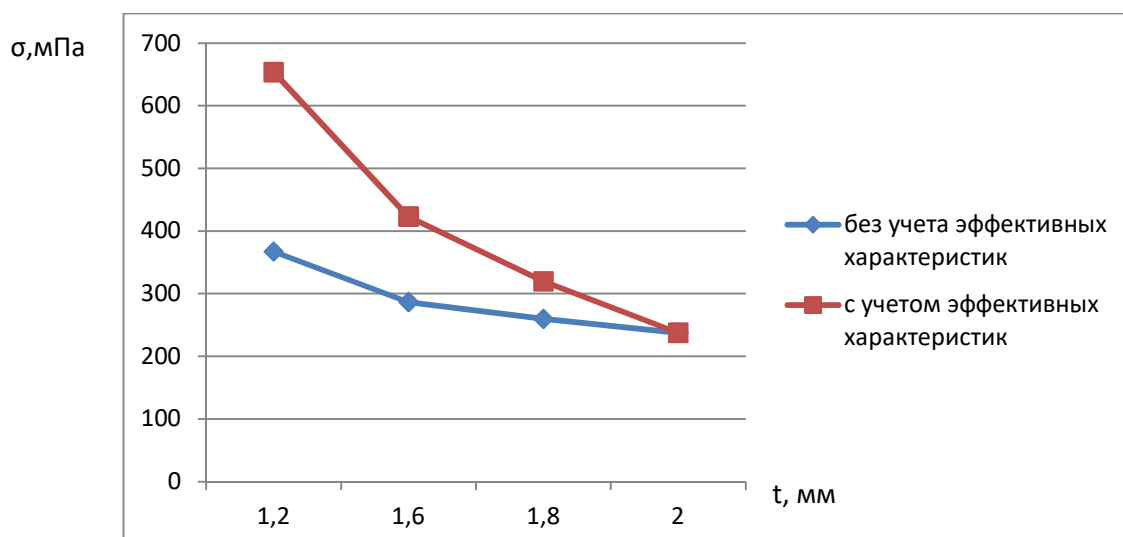
Профиль НК 06Ц:



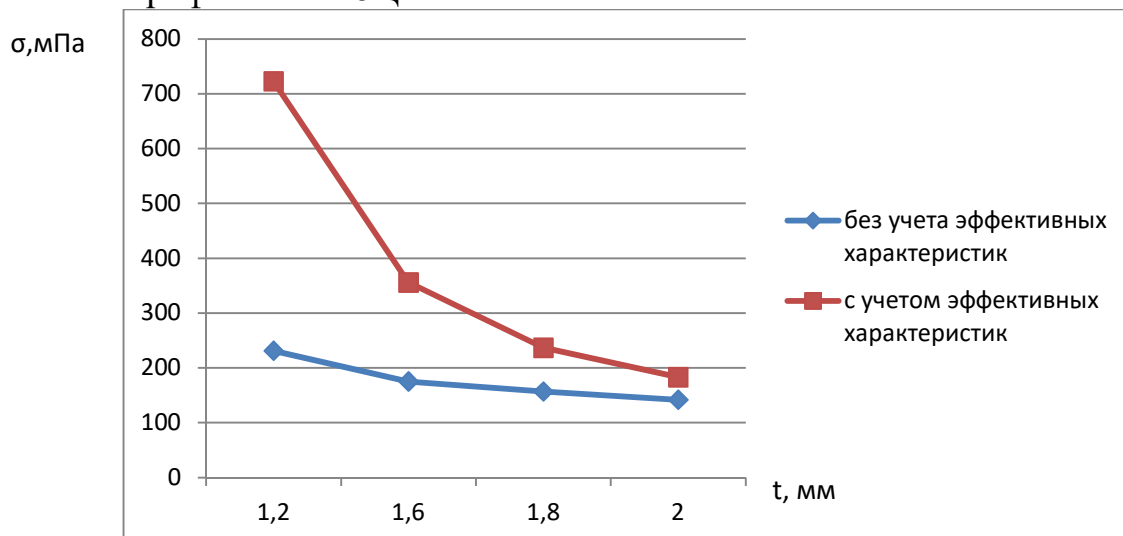
Профиль НК 46Ц:



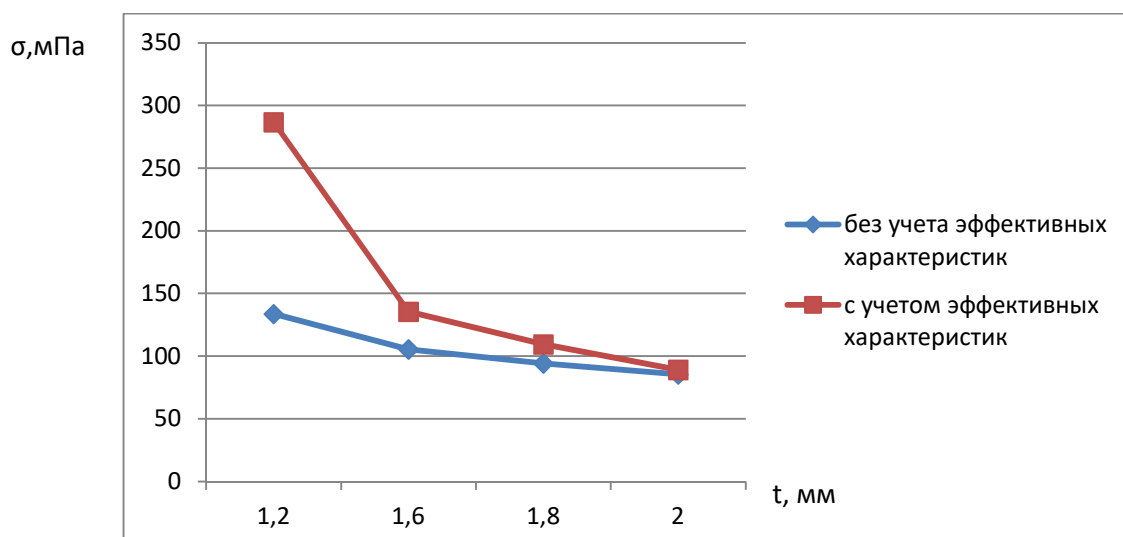
Профиль НК 47Ц:



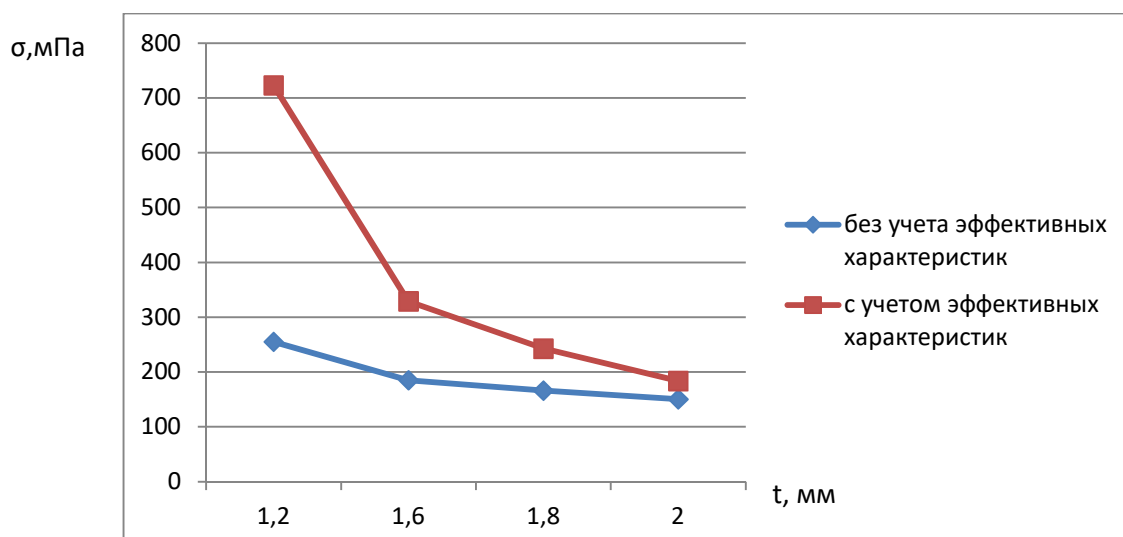
Профиль НК 28Ц:



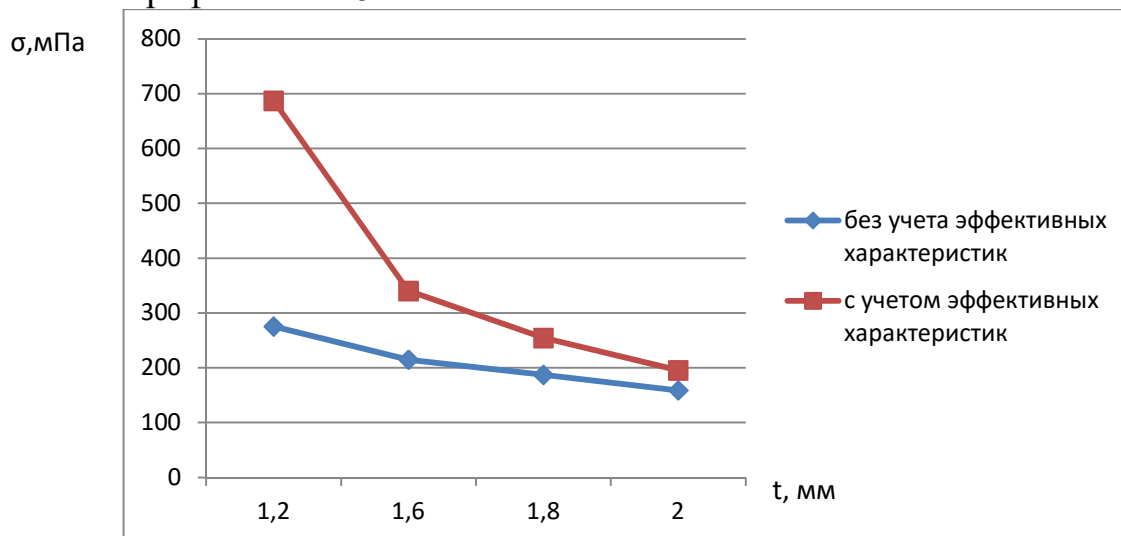
Профиль НК 04А:



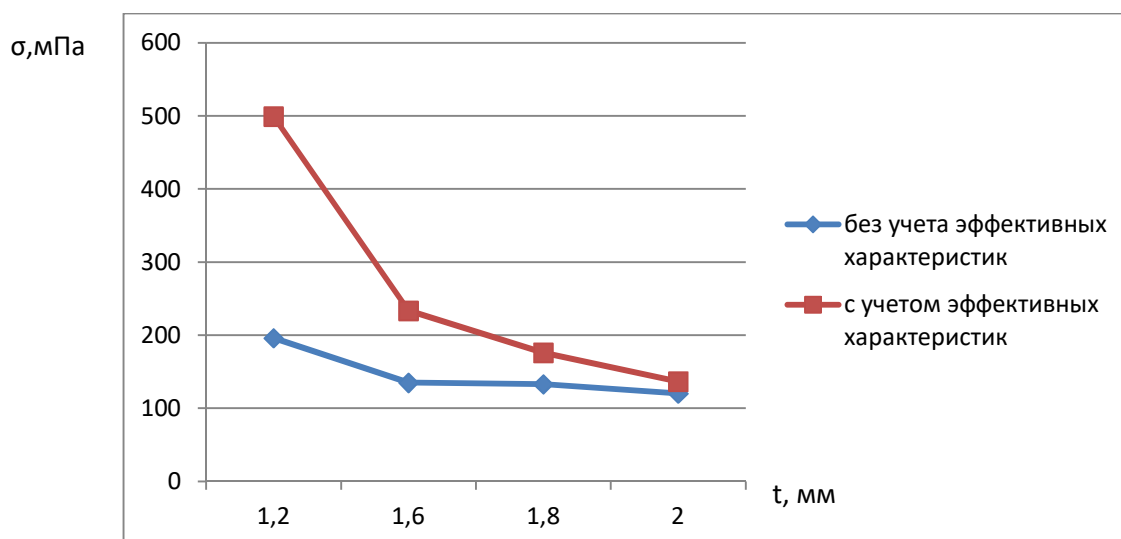
Профиль НК 06А:



Профиль НК 28А:



Профиль НК 46А:



Рассчитаем расхождение напряжений в процентном соотношении при учете редуцированных характеристик и без. Результаты расчета приведены в таблице 2 0 0

Таблица 2 0 0 - Результаты анализа нормальных и касательных напряжения с учетом эффективных характеристик и без

Профиль	Толщина (мм)	Разница нормальных напряжений при учете редуцированных характеристик и без (%)
НК 05 Ц	t= 0 2 мм	440,05%
	t= 0 6 мм	3 05,37%
	t= 0 8 мм	230,23%
	t=2 мм	05 0,64%
НК 04 Ц	t= 0 2 мм	028,84%
	t= 0 6 мм	58,28%
	t= 0 8 мм	34, 04%
	t=2 мм	4,96%
НК 06 Ц	t= 0 2 мм	049,66%
	t= 0 6 мм	44,60%
	t= 0 8 мм	08,63%
	t=2 мм	0,98%
НК 46 Ц	t= 0 2 мм	0 07,94%
	t= 0 6 мм	38,26%
	t= 0 8 мм	7,59%
	t=2 мм	0,00%
НК47 Ц	t= 0 2 мм	77,3 0%
	t= 0 6 мм	47, 08%
	t= 0 8 мм	22,83%
	t=2 мм	0,00%
НК 28 Ц	t= 0 2 мм	2 0 0, 00%



	t= 0 6 MM	002, 08%
	t= 0 8 MM	50,35%
	t=2 MM	28,74%
HK 06 A	t= 0 2 MM	08 0,37%
	t= 0 6 MM	77,0 0%
	t= 0 8 MM	45,74%
	t=2 MM	2 0,80%
HK 28 A	t= 0 2 MM	048,67%
	t= 0 6 MM	57,78%
	t= 0 8 MM	35,58%
	t=2 MM	22,80%
HK 46 A	t= 0 2 MM	053,62%
	t= 0 6 MM	72,45%
	t= 0 8 MM	32,2 0%
	t=2 MM	03,88%
HK 04 A	t= 0 2 MM	0 02,99%
	t= 0 6 MM	28,25%
	t= 0 8 MM	05,96%
	t=2 MM	3,96%

Проанализировав результаты расчета профилей работающих на сжатие, можно сделать вывод о зависимости несущей способности от площади поперечного сечения элементов.

Расхождение геометрические характеристики поперечного сечения профилей с учетом редуцирования и без отличаются:

- площадь примерно на 20 до 60 %;
- момент сопротивления поперечного сечения примерно на 40 %;
- момент инерции примерно на 20 %.

Запас прочности профилей составляет 50-70 % с учетом редуцирования.

## Выводы по главе 2

Проанализировав основные методики расчета, мною выявлены особенности, достоинства и недостатки. На основе положений СП 260 0325800 проведены численные исследования Г-образных, Т-образных и угловых профилей на изгиб и сжатие.

0 В результате аналитического расчета элементов, работающих на изгиб, Г-образных, Т-образных и угловых профилей получено: эффективные характеристики поперечного сечения профилей имеют значительное влияние на их несущую способность.

2 Анализ расчета профилей на изгиб показал, что при условии, что толщина профилей составляет не менее 0,2 мм, периметр поперечного сечения профилей не менее 40 мм, профили подвержены местной потере устойчивости.

3 Анализ расчета профилей на сжатие показал, что если площадь поперечного сечения менее  $60 \text{ мм}^2$  профили не устойчивы, но если более  $60 \text{ мм}^2$  устойчивы, и имеют запас прочности.

4 При расчете тонкостенных профилей необходимо учитывать эффективные характеристики поперечного сечения. Перед началом расчета все профили необходимо проверять на допустимое соотношение толщины к длине, так как по теоретическим данным не все тонкостенные профили могут подвергаться потере местной устойчивости.

## ГЛАВА III ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛСТК

### 3 0 Методика проведения испытания

Для определения возникновения потери местной устойчивости тонкостенных профилей проведено испытание Т-образных и Г-образных профилей производства КРАСПАН

Цель эксперимента: сопоставление результатов с численными исследованиями

Задачи:

- 0 Оценка НДС элементов НФС из холодногнутой оцинкованной стали
- 2 Оценка характера потери устойчивости профилей (общая или местная)
- 3 Анализ полученных результатов, и выявление общих с теоретическими расчетами закономерностей

Методика проведения испытания:

- 0 Подготовка объектов исследования  
Т-образные профили : НК 04Ц, НК46Ц, НК 04А, НК46А  
Г-образные профили: НК 06Ц, НК 06А, НК28А, НК28Ц
- 2 Подготовка оборудования к испытанию, разрывной машины Instron 3369, проверка технической исправности, подключения к компьютеру
- 3 Профили по очереди помещаются в машину (рисунок 3 0), на подготовленную заранее площадку, так как высота профиля больше чем сжимающие пластины В ходе испытания сжимающая нагрузка со скоростью 05 мм/мин передается на профиль НФС Результаты отображаются на компьютере, сохраняются и записываются Каждый шаг испытания фиксируется

### 3 2 Объекты исследования

Объектами исследования являются холодногнутого оцинкованные и алюминиевые профили приведенные в таблице 3 0

Таблица 3 0 - Объекты экспериментального исследования

Профиль	Длина (мм)	Количество (шт)
Т-образные профили		
НК 04Ц	650	5

НК46Ц	650	5
НК 04А	650	5
НК46А	650	5
Г-образные профили		
НК 06Ц	650	5
НК28Ц	650	5
НК 06А	650	5
НК28А	650	5

### **3.3 Ход испытания профиля НК 04 А**

0 Раскладываем все профили и фиксируем состояние до начала испытания

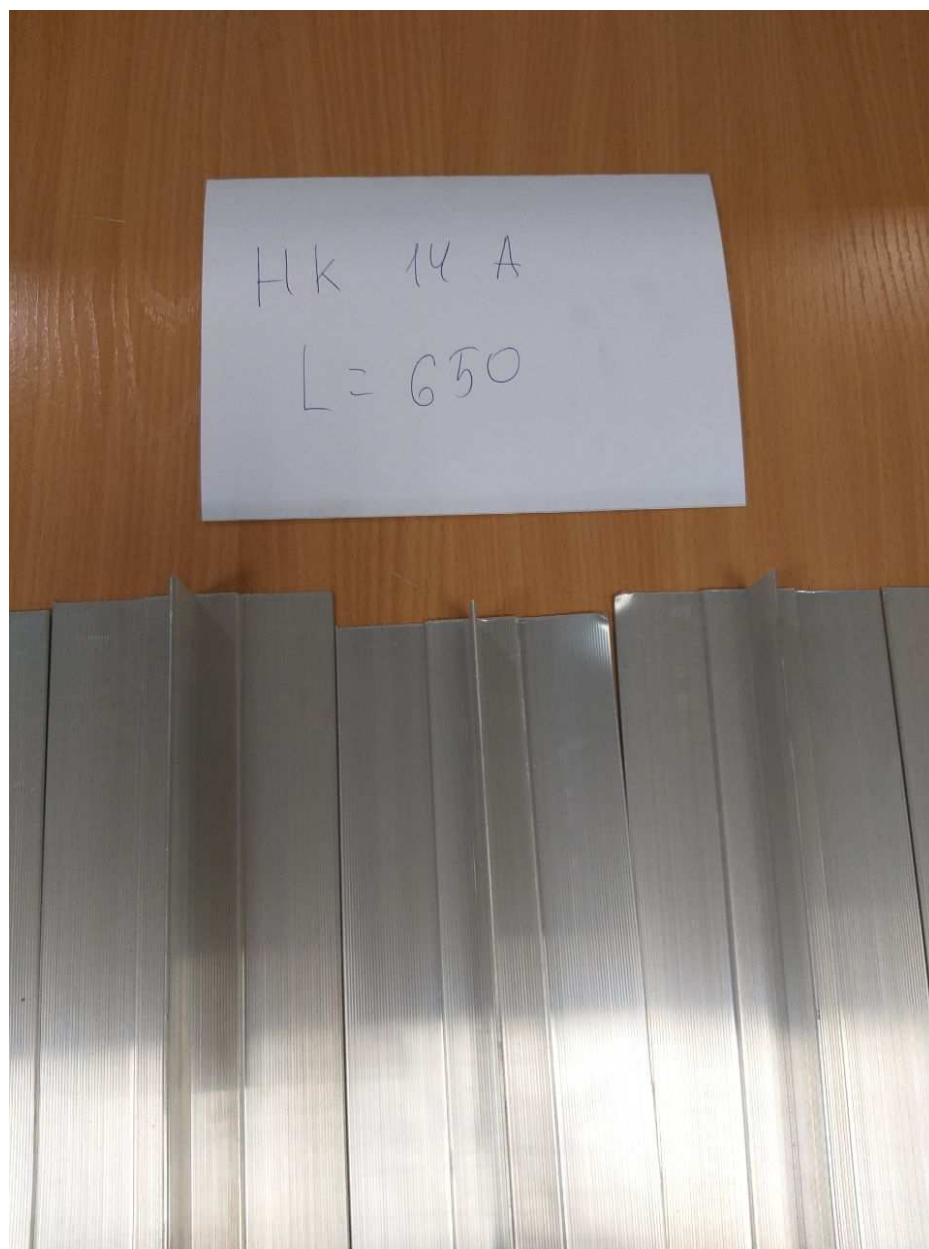


Рисунок 3 0 - Профиль НК 04А

2 Включаем разрывную машину Instron 3369, поднимаем платформы до необходимого уровня, для того чтобы установить профиль в экспериментальное положение Устанавливаем профиль (рисунок 3 2 )

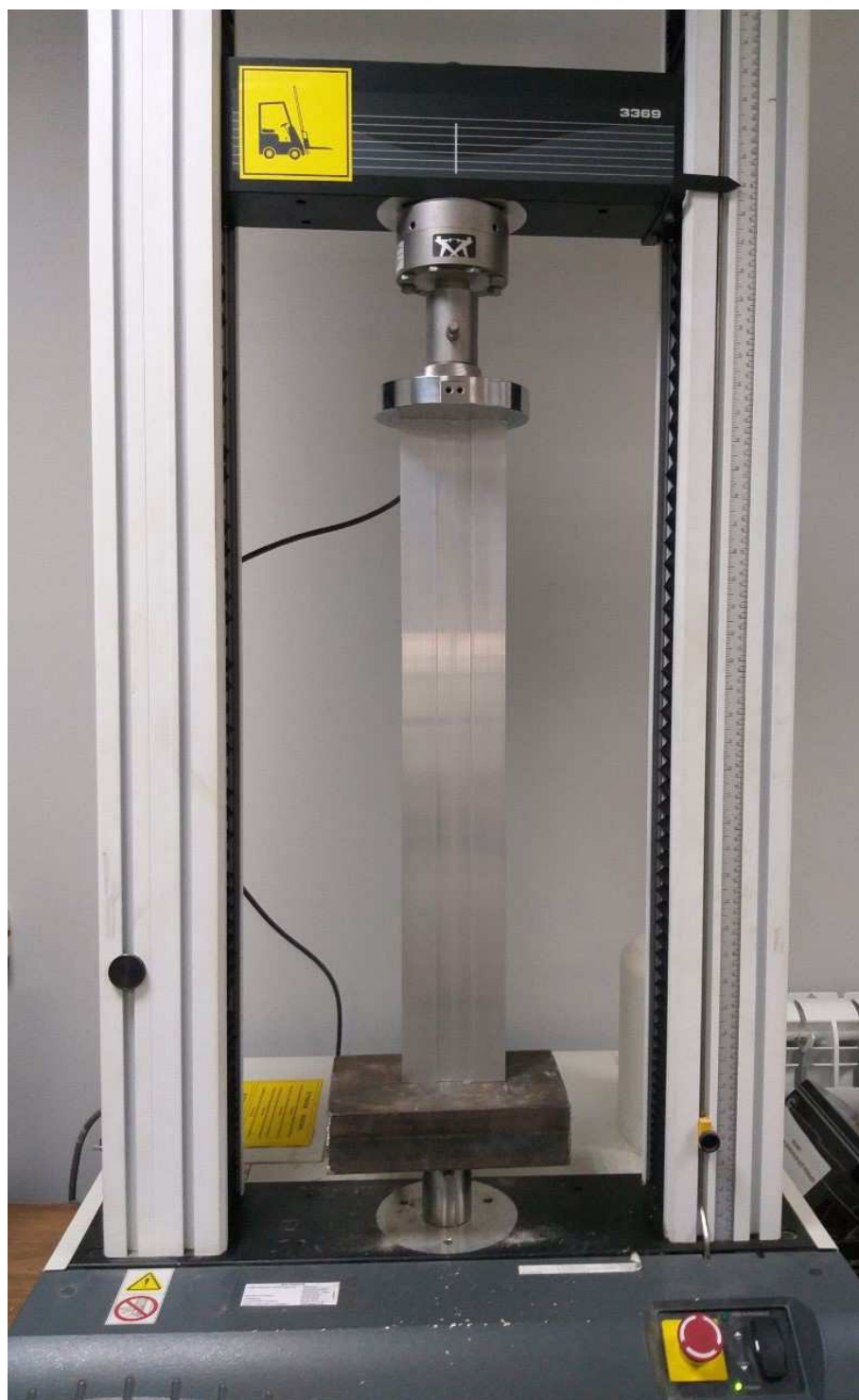


Рисунок 3 2 - Экспериментальное положение профиля НК 04А

3 Нажимаем кнопку "выполнить" в программе компьютера и наблюдаем за поведением профиля под действием нагрузки Сжимающая нагрузка со скоростью 05 мм/мин передается на профиль НФС, фиксируем момент потери местной и общей устойчивости (рисунок 3 3) Сохраняем результаты Профиль НК 04А начинает терять местную устойчивость на первой минуте испытания, затем происходит потеря общей устойчивости профиля



Рисунок 3 3 - Фиксация потери общей и местной устойчивости профиля НК 04А

4 Извлекаем использованный профиль из разрывной машины Испытываем профиль НК 04А необходимое количество раз Сохраняем результаты, в виде графиков зависимости нагрузки при сжатии и деформации при сжатии (рисунок 3 4)





Рисунок 3.4 - График зависимости нагрузки при сжатии (кН) и деформации при сжатии (%) профиля НК 04А

Результаты испытаний других профилей приведены в пункте 3.2

### 3.2 Обработка полученных результатов

В ходе экспериментальных исследований, получена максимальная нагрузка на сжатие, напряжение при максимальной нагрузке, а так же деформация при сжатии. Полученные результаты представлены в таблице 3.2 и на рисунках 3.5-3.02

Таблица 3.2 Максимальная нагрузка при сжатии и напряжение при максимальной нагрузке в профилях

Профиль		№	Длина (мм)	Скорость (мм/мин)	Максимальная нагрузка на сжатие (кН)	Напряжение при максимальной нагрузке на сжатие (МПа)
Г-образные	НК 06Ц	0	650	05	9,02	22,55
		2	650		9,24	23,00
		3	650		9,26	23,07
		4	650		9,58	23,95
		5	650		8,86	22,06
	НК 28Ц	0	650	05	8,53	20,33
		2	650		7,05	07,87

		3	650		00,07	25, 09	
		4	650		9,38	23,46	
		5	650		00,25	25,64	
	HK 06A	0	650	05	02,42	3 0,04	
		2	650		00,66	26,65	
		3	650		6,68	06,7 0	
		4	650		03,24	33,09	
		5	650		07,02	42,56	
	HK 28A	0	650	05	03, 06	32,90	
		2	650		0 0,34	28,36	
		3	650		02,6 0	3 0,54	
		4	650		7,96	09,89	
		5	650		8,94	22,36	
	Т-образные	HK 04Ц	0	650	05	24,33	60,86
			2	650		26,36	65,9 0
3			650	09,26		48, 06	
4			650	2 0,46		53,64	
5			650	09,89		49,74	
HK 46Ц		0	650	05	25,49	63,72	
		2	650		24, 07	60,44	
		3	650		23,88	59,70	
		4	650		20,80	52,00	
HK 04A		0	650	05	22,9 0	57,26	
		2	650		22,89	57,23	

		3	650		23,90	59,75
		4	650		09,55	48,88
		5	650		24,05	60,05
	НК 46А	0	650	05	26,55	66,39
		2	650		28,64	70,60
		3	650		28,05	70,04
		4	650		26,79	66,99
		5	650		26,60	70,50

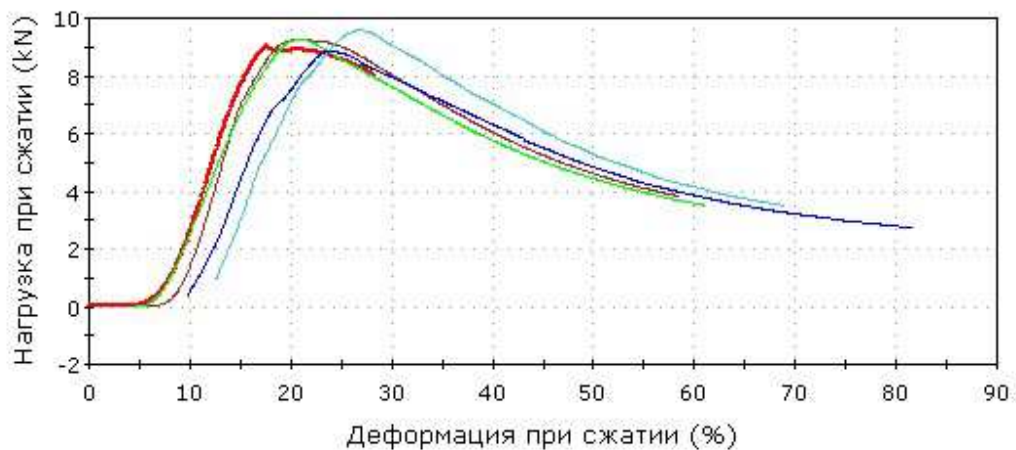


Рисунок 3 5 - График зависимости нагрузки от сжатия (кН) и деформации от сжатия (%) профиля НК 06Ц (количество образцов - 5)

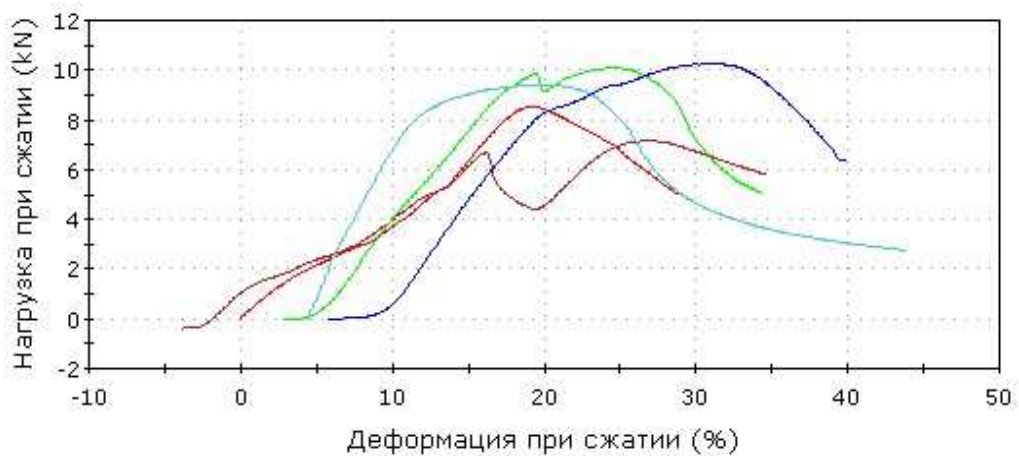


Рисунок 3 6 - График зависимости нагрузки от сжатия (кН) и деформации от сжатия (%) профиля НК 28Ц (количество образцов - 5)

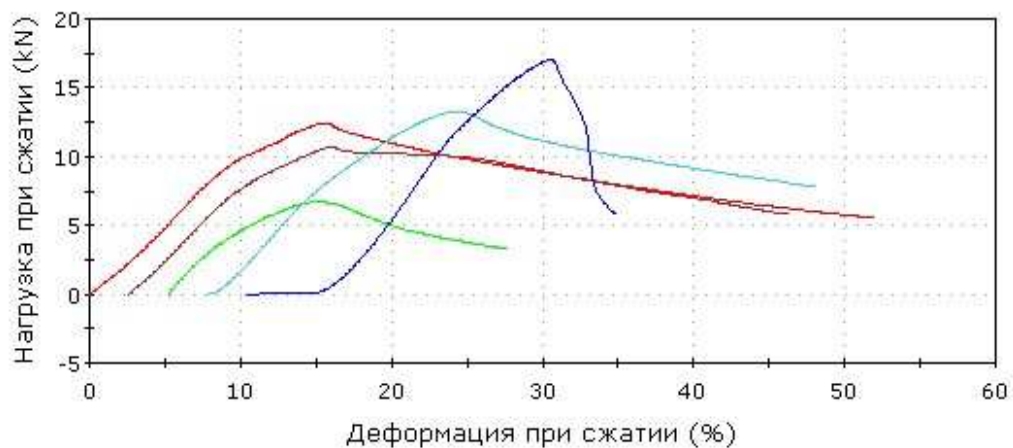


Рисунок 3 7 - График зависимости нагрузки от сжатия (kN) и деформации от сжатия (%) профиля НК 06А (количество образцов - 5)

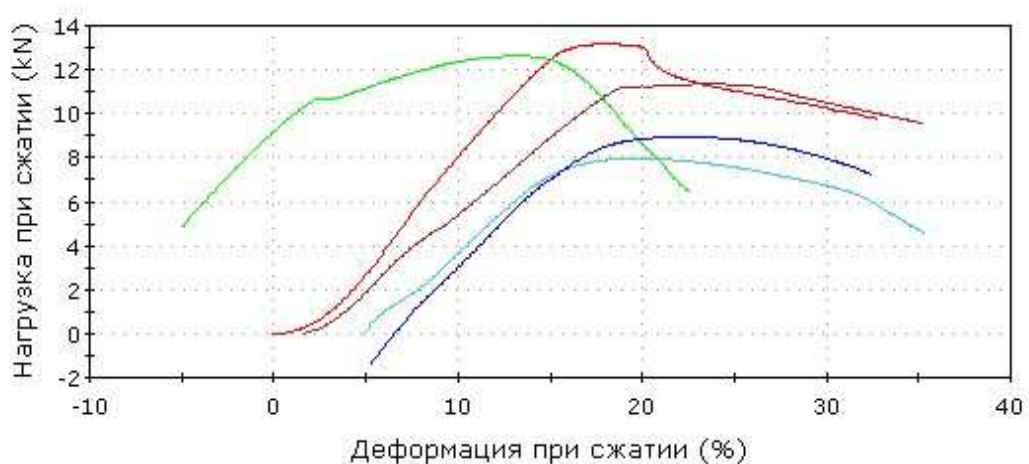


Рисунок 3 8 - График зависимости нагрузки от сжатия (kN) и деформации от сжатия (%) профиля НК 28А (количество образцов - 5)

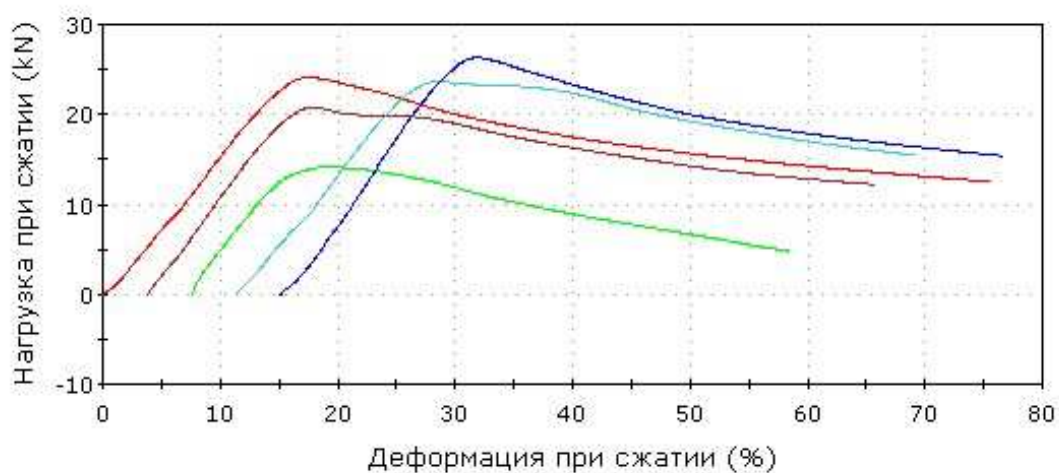


Рисунок 3 9 - График зависимости нагрузки от сжатия (kN) и деформации от сжатия (%) профиля НК 04Ц (количество образцов - 5)

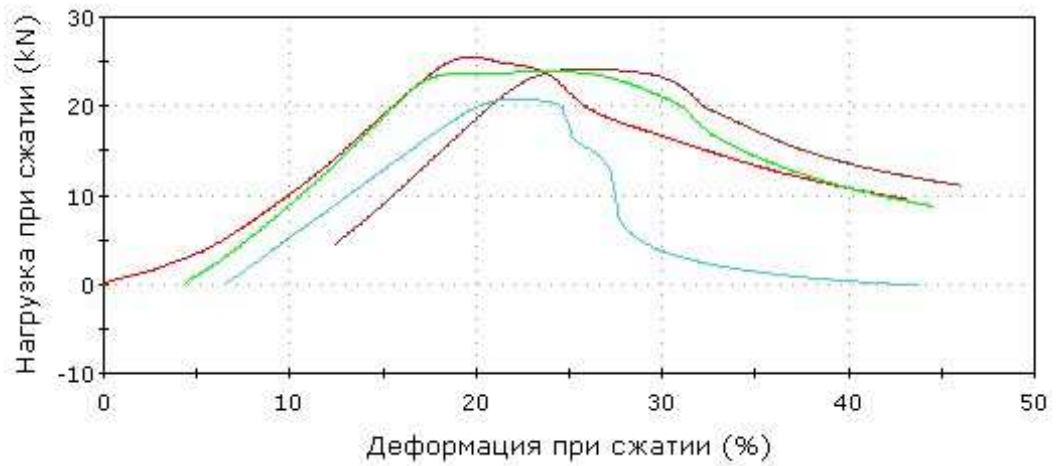


Рисунок 3 00 - График зависимости нагрузки от сжатия (kN) и деформации от сжатия (%) профиля НК 46Ц (количество образцов - 5)

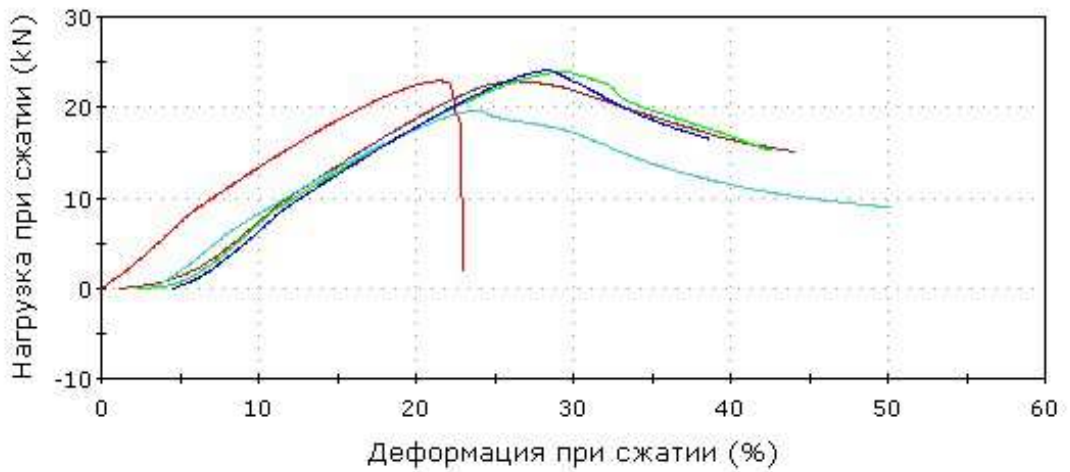


Рисунок 3 00 - График зависимости нагрузки от сжатия (kN) и деформации от сжатия (%) профиля НК 04А (количество образцов - 5)

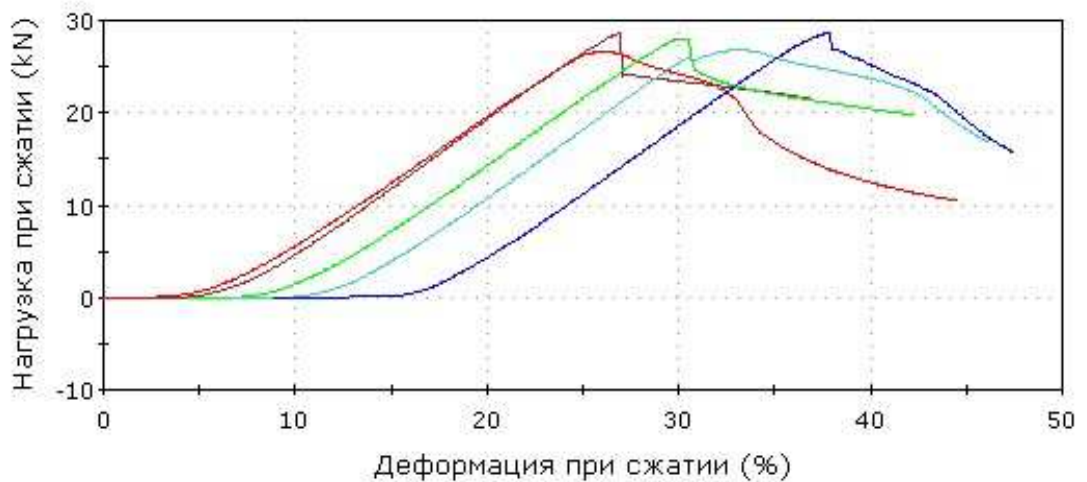


Рисунок 3 02 - График зависимости нагрузки от сжатия (kN) и деформации от сжатия (%) профиля НК 46А (количество образцов - 5)

### 3.3 Сопоставление результатов

Сопоставление экспериментальных данных с результатами численных расчетов приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 - Сопоставление экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов

Профиль		Максимальная нагрузка на сжатие по теоретическому расчету (кН)	Средняя максимальная нагрузка на сжатие из опыта (кН)	$\delta$ , % расхождения
Г-образные	НК 06Ц	5,54	9,09	66
	НК 28Ц	6,66	9,07	36
	НК 06А	00,58	02,0	03
	НК 28А	8,70	00,8	24
Т-образные	НК 04Ц	08,55	22,26	20
	НК 46Ц	06,20	23,58	45
	НК 04А	04,7	22,66	54
	НК 46А	20,0	27,32	30

Оценку потери устойчивости можно сделать на основании таблицы сопоставления потери устойчивости профиля при приложении сжимающей нагрузки (таблица 3.4)

Таблица 3.4 - Сопоставление результатов потери устойчивости профиля при численных и экспериментальных исследованиях

	Г-образные профили			Т-образные профили	
	численные исследования	экспериментальные исследования		численные исследования	экспериментальные исследования

НК 06Ц	остался устойчив	потерял устойчивость	НК 04Ц	потерял устойчивость	потерял устойчивость
НК28Ц	остался устойчив	потерял устойчивость	НК46Ц	потерял устойчивость	потерял устойчивость
НК 06А	потерял устойчивость	потерял устойчивость	НК 04А	потерял устойчивость	потерял устойчивость
НК28А	потерял устойчивость	потерял устойчивость	НК46А	потерял устойчивость	потерял устойчивость

### Выводы по главе III

При проведении испытания и сопоставления результатов с численными исследованиями получены следующие результаты:

0 Ребра жесткости увеличивают запас прочности профилей и не допускают значительных деформаций

2 Профили, не имеющие ребра жесткости, и ребристую поверхность (Профиль НК 06А) начинают терять местную устойчивость в начале эксперимента

3 Профили толщиной 0 2 мм, и небольшие геометрические параметры стенки и полки (по результатам численных исследований их эффективная площадь сечения не более 60 мм<sup>2</sup>) выдерживают наименьшую максимальную нагрузку даже при наличии ребер жесткости (Профиль НК 06Ц)

3 Экспериментальные исследования показали, что у всех профилей происходит сначала потеря местной устойчивости, затем только потеря общей устойчивости, что подтверждает необходимость учета особенностей тонкостенных профилей, а именно вычисления эффективной ширины

## ГЛАВА IV

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НФС С УЧЕТОМ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ

#### 3. 0 Обновленные алгоритмы расчета

В результаты численных и экспериментальных исследований, а также сделанных на их основе выводов, рекомендуется внести изменения в существующую методику расчета.

В основном алгоритме расчета второй этап - проверка параметров, должен выполняться более тщательно. А именно, расчету с учетом эффективных характеристик сечения, должны подлежать угловые вертикальные профили площадью не менее  $020 \text{ см}^2$ , также Г-образные профили площадью не менее  $020 \text{ см}^2$ .

#### Проверка геометрических параметров

$b/t$	$< 60 \text{ см}$	<b>условие выполняется</b>
A	$< 020 \text{ см}^2$	<b>условие выполняется</b>

Пункт расчета, подлежащий изменению, указан на рисунке 3. 0 для элементов работающих, на изгиб и рисунке 3.2 для профилей работающих, на сжатие соответственно.



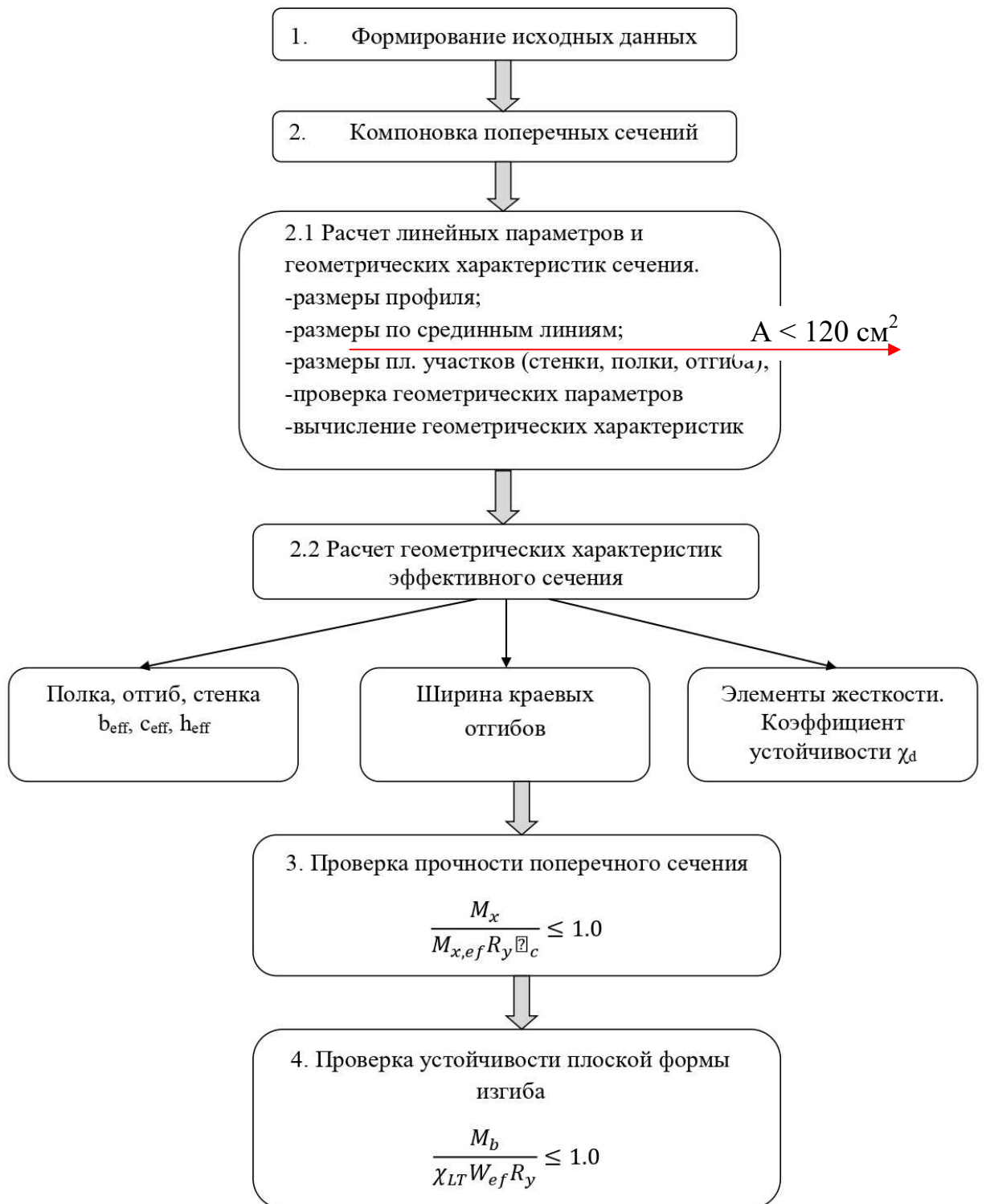


Рисунок 3. 0 - Обновленный алгоритм расчета элементов работающих на изгиб

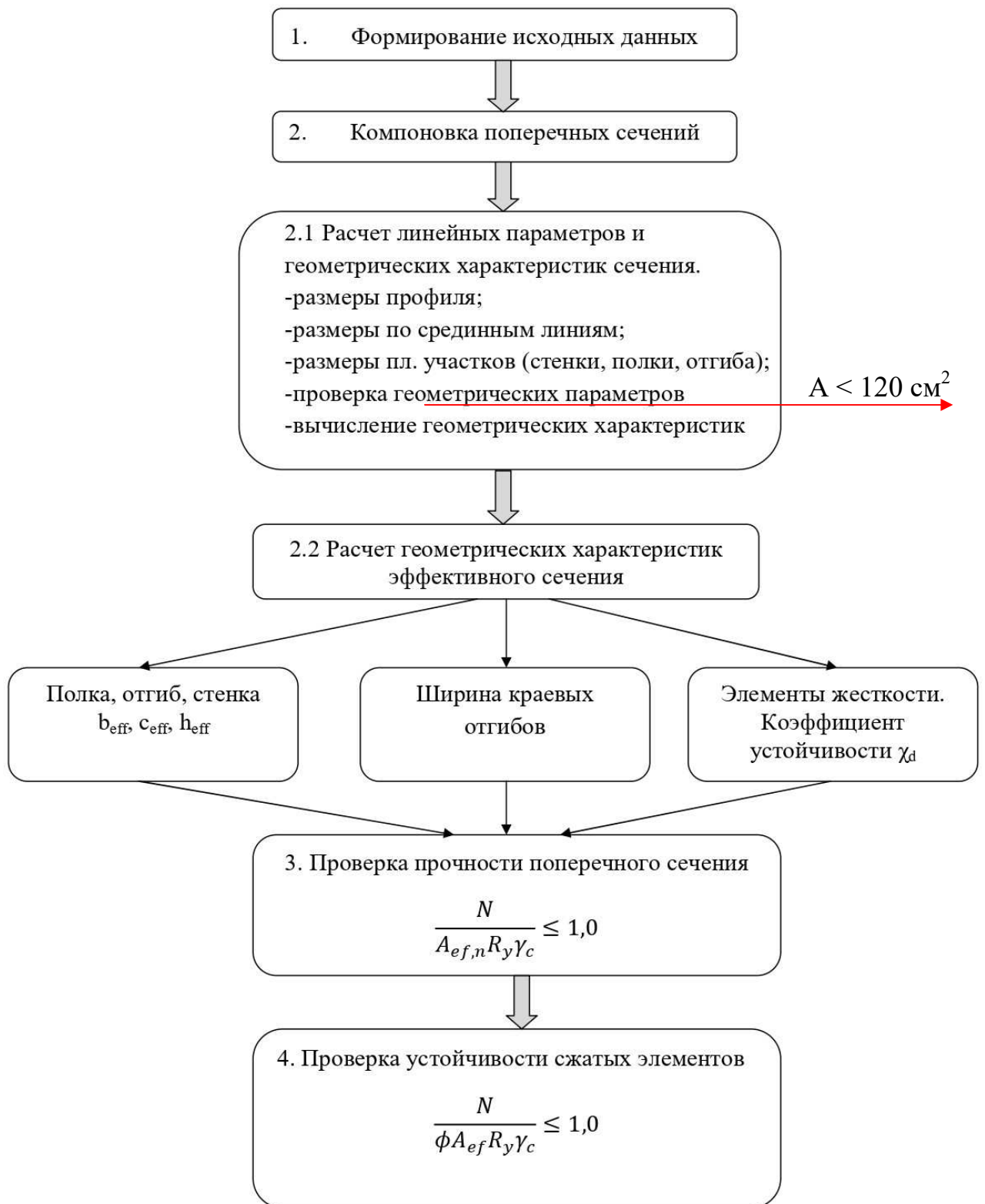


Рисунок 2. 03 - Обновленный алгоритм расчета элементов, работающих на сжатие

### 3. 0 Унифицированный расчет усилий от единичной нагрузки

Во Главе II пункт 2.4.3 и 2.5.3 был произведен расчет объектов исследования работающих на изгиб и сжатие, в качестве исходных данных были приняты: расчетная схема – двухпролетная, шарнирно опертая консольная балка, пролеты по 0 м, консоли по 0,6 м, загружена горизонтальной вертикальной соответственно равномерно-распределенной нагрузкой равной 0 кН/м.

Так как при расчете НФС применяется большое количество параметров, зависящие от:

- района строительства,
- веса облицовки,
- шага кронштейнов,
- выбранного профиля и так далее.

Результатом расчета приведенного в главе 2 является, унификация.

Данную унифицированную методику расчета можно использовать в практических расчетах.

Алгоритм применения унифицированной методики:

0. Определяем фактическую грузовую нагрузку;
2. Усилие от единичной нагрузки приведенное в таблице 3. 0 умножаем на фактическое значение грузовой нагрузки;
3. Получаем усилие от фактической нагрузки.

Таким образом, мы облегчаем расчет, что позволяет проектировать объекты НФС с приличным сокращением времени на расчет. Усилия от единичной нагрузки с учетом эффективных характеристик профиля представлены в таблицах 3. 0, 3.2.

Таблица 3.1 - Усилия от единичной нагрузки с учетом эффективных характеристик холодногнутых профилей работающих на изгиб ( M, кН\*м)

НК 15.Ц	НК 14.Ц	НК 16.Ц	НК 46.Ц	НК 47.Ц	НК 28.Ц	НК 16.А	НК 28.А	НК 46.А	НК 14.А
0,07	0,08	0,04	0,11	0,07	0,02	0,04	0,02	0,08	0,09

Таблица 3 2 - Усилия от единичной нагрузки с учетом эффективных характеристик холодногнутых профилей работающих на сжатие (N, кН)

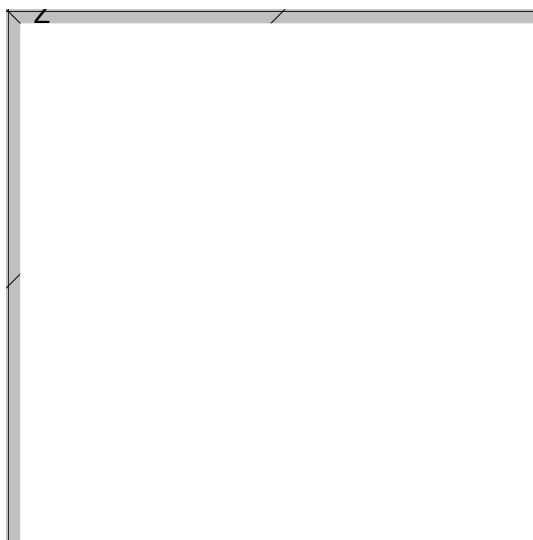
НК 05 Ц	НК 04 Ц	НК 06 Ц	НК 46 Ц	НК 47 Ц	НК 28 Ц	НК 06 А	НК 28 А	НК 46 А	НК 04 А
0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,3	0,5	0,6

## **Выводы по главе IV**

В результате численных и экспериментальных исследований обновлен существующий алгоритм расчет. В результате получено, что оптимально использовать профили навесных фасадных систем, работающих на изгиб и сжатие, с площадью не менее  $0,20\text{ м}^2$

Полученные унифицированные значения можно использовать в практических целях для расчета НДС, тем самым значительно сокращая время работы

### Геометрические характеристики профиля НК 15Ц



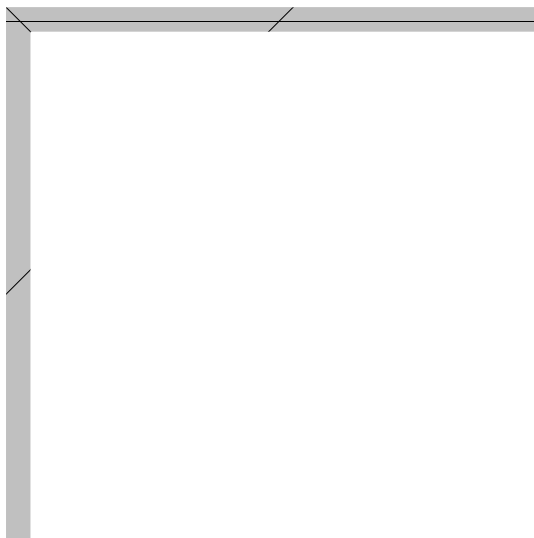
Элемент сечения	Угол	Зеркально
Лист 51 x 1,2	0 град	-
Лист 49,8 x 1,2	90 град	-

Габариты 51 x 51 мм

Геометрические характеристики			
	Параметр	Значение	Единицы измерения
A	Площадь поперечного сечения	120,96	мм <sup>2</sup>
$\alpha$	Угол наклона главных осей инерции	-45	град
$I_y$	Момент инерции относительно центральной оси Y1 параллельной оси Y	32018,716	мм <sup>4</sup>
$I_z$	Момент инерции относительно центральной оси Z1 параллельной оси Z	32018,716	мм <sup>4</sup>
$I_t$	Момент инерции при свободном кручении	54,632	мм <sup>4</sup>
$i_y$	Радиус инерции относительно оси Y1	16,27	мм
$i_z$	Радиус инерции относительно оси Z1	16,27	мм
$W_{u+}$	Максимальный момент сопротивления относительно оси U	1420,228	мм <sup>3</sup>
$W_{u-}$	Минимальный момент сопротивления относительно оси U	1420,228	мм <sup>3</sup>
$W_{v+}$	Максимальный момент сопротивления относительно оси V	702,654	мм <sup>3</sup>
$W_{v-}$	Минимальный момент сопротивления относительно оси V	686,873	мм <sup>3</sup>
$W_{pl,u}$	Пластический момент сопротивления относительно оси U	1979,779	мм <sup>3</sup>
$W_{pl,v}$	Пластический момент сопротивления относительно оси V	980,499	мм <sup>3</sup>
$I_u$	Максимальный момент инерции	51216,883	мм <sup>4</sup>
$I_v$	Минимальный момент инерции	12820,55	мм <sup>4</sup>

$i_u$	Максимальный радиус инерции	20,577	мм
$i_v$	Минимальный радиус инерции	10,295	мм
$a_{u+}$	Ядровое расстояние вдоль положительного направления оси Y(U)	5,809	мм
$a_{u-}$	Ядровое расстояние вдоль отрицательного направления оси Y(U)	5,679	мм
$a_{v+}$	Ядровое расстояние вдоль положительного направления оси Z(V)	11,741	мм
$a_{v-}$	Ядровое расстояние вдоль отрицательного направления оси Z(V)	11,741	мм
$y_m$	Координата центра масс по оси Y	13,198	мм
$z_m$	Координата центра масс по оси Z	-13,198	мм
$I_1$	Момент инерции относительно глобальной оси Y	53089,085	мм <sup>4</sup>
$I_2$	Момент инерции относительно глобальной оси Z	53089,085	мм <sup>4</sup>
$I_p$	Полярный момент инерции	64037,433	мм <sup>4</sup>
$i_p$	Полярный радиус инерции	23,009	мм
$W_p$	Полярный момент сопротивления	1599,353	мм <sup>3</sup>

## Геометрические характеристики профиля НК 47Ц



Элемент сечения	Угол	Зеркально
Лист 27,5 x 1,2	0 град	-
Лист 26,3 x 1,2	90 град	-

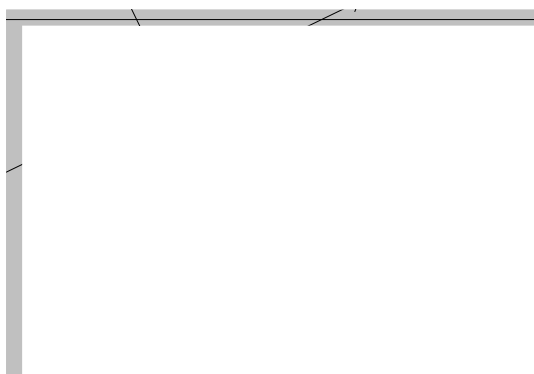
Габариты 27,5 x 27,5 мм

Геометрические характеристики			
	Параметр	Значение	Единицы измерения
A	Площадь поперечного сечения	64,56	мм <sup>2</sup>
$\alpha$	Угол наклона главных осей инерции	-45	град
$I_y$	Момент инерции относительно центральной оси Y1 параллельной оси Y	4873,055	мм <sup>4</sup>
$I_z$	Момент инерции относительно центральной оси Z1 параллельной оси Z	4873,055	мм <sup>4</sup>
$I_t$	Момент инерции при свободном кручении	29,122	мм <sup>4</sup>
$i_y$	Радиус инерции относительно оси Y1	8,688	мм
$i_z$	Радиус инерции относительно оси Z1	8,688	мм
$W_{u+}$	Максимальный момент сопротивления относительно оси U	400,604	мм <sup>3</sup>
$W_{u-}$	Минимальный момент сопротивления относительно оси U	400,604	мм <sup>3</sup>
$W_{v+}$	Максимальный момент сопротивления относительно оси V	196,808	мм <sup>3</sup>
$W_{v-}$	Минимальный момент сопротивления относительно оси V	188,924	мм <sup>3</sup>
$W_{pl,u}$	Пластический момент сопротивления относительно оси U	511,726	мм <sup>3</sup>
$W_{pl,v}$	Пластический момент сопротивления относительно оси V	281,84	мм <sup>3</sup>
$I_u$	Максимальный момент инерции	7789,917	мм <sup>4</sup>
$I_v$	Минимальный момент инерции	1956,193	мм <sup>4</sup>
$i_u$	Максимальный радиус инерции	10,985	мм
$i_v$	Минимальный радиус инерции	5,505	мм
$a_{u+}$	Ядровое расстояние вдоль положи-	3,048	мм

	тельного направления оси Y(U)		
$a_{u-}$	Ядровое расстояние вдоль отрицательного направления оси Y(U)	2,926	мм
$a_{v+}$	Ядровое расстояние вдоль положительного направления оси Z(V)	6,205	мм
$a_{v-}$	Ядровое расстояние вдоль отрицательного направления оси Z(V)	6,205	мм
$y_m$	Координата центра масс по оси Y	-20,178	мм
$z_m$	Координата центра масс по оси Z	-6,722	мм
$I_1$	Момент инерции относительно глобальной оси Y	31159,669	мм <sup>4</sup>
$I_2$	Момент инерции относительно глобальной оси Z	7789,917	мм <sup>4</sup>
$I_p$	Полярный момент инерции	9746,111	мм <sup>4</sup>
$i_p$	Полярный радиус инерции	12,287	мм
$W_p$	Полярный момент сопротивления	454,034	мм <sup>3</sup>



## Геометрические характеристики профиля НК 16Ц



Элемент сечения	Угол	Зеркально
Лист 40,7 x 1,2	0 град	-
Лист 27 x 1,2	90 град	-

Габариты 40,7 x 28,2 мм

Геометрические характеристики			
	Параметр	Значение	Единицы измерения
A	Площадь поперечного сечения	81,24	мм <sup>2</sup>
$\alpha$	Угол наклона главных осей инерции	-64,035	град
$I_y$	Момент инерции относительно центральной оси Y1 параллельной оси Y	5846,639	мм <sup>4</sup>
$I_z$	Момент инерции относительно центральной оси Z1 параллельной оси Z	14343,551	мм <sup>4</sup>
$I_t$	Момент инерции при свободном кручении	36,662	мм <sup>4</sup>
$i_y$	Радиус инерции относительно оси Y1	8,483	мм
$i_z$	Радиус инерции относительно оси Z1	13,288	мм
$W_{u+}$	Максимальный момент сопротивления относительно оси U	815,169	мм <sup>3</sup>
$W_{u-}$	Минимальный момент сопротивления относительно оси U	604,403	мм <sup>3</sup>
$W_{v+}$	Максимальный момент сопротивления относительно оси V	289,892	мм <sup>3</sup>
$W_{v-}$	Минимальный момент сопротивления относительно оси V	216,234	мм <sup>3</sup>
$W_{pl,u}$	Пластический момент сопротивления относительно оси U	862,068	мм <sup>3</sup>
$W_{pl,v}$	Пластический момент сопротивления относительно оси V	404,929	мм <sup>3</sup>
$I_u$	Максимальный момент инерции	16985,052	мм <sup>4</sup>
$I_v$	Минимальный момент инерции	3205,139	мм <sup>4</sup>
$i_u$	Максимальный радиус инерции	14,459	мм
$i_v$	Минимальный радиус инерции	6,281	мм
$a_{u+}$	Ядровое расстояние вдоль положи-	3,568	мм

	тельного направления оси Y(U)		
$a_{u-}$	Ядровое расстояние вдоль отрицательного направления оси Y(U)	2,662	мм
$a_{v+}$	Ядровое расстояние вдоль положительного направления оси Z(V)	10,034	мм
$a_{v-}$	Ядровое расстояние вдоль отрицательного направления оси Z(V)	7,44	мм
$y_m$	Координата центра масс по оси Y	-28,227	мм
$z_m$	Координата центра масс по оси Z	-5,623	мм
$I_1$	Момент инерции относительно глобальной оси Y	70574,157	мм <sup>4</sup>
$I_2$	Момент инерции относительно глобальной оси Z	16912,517	мм <sup>4</sup>
$I_p$	Полярный момент инерции	20190,19	мм <sup>4</sup>
$i_p$	Полярный радиус инерции	15,765	мм
$W_p$	Полярный момент сопротивления	698,512	мм <sup>3</sup>

**Справочник геометрических параметров сечений профилей с учетом эффективных характеристик**

**1. Профиль НК 05Ц**

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 50$  мм;  $b = 50$  мм;  $\delta = 0,2$  мм.

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б. 0.

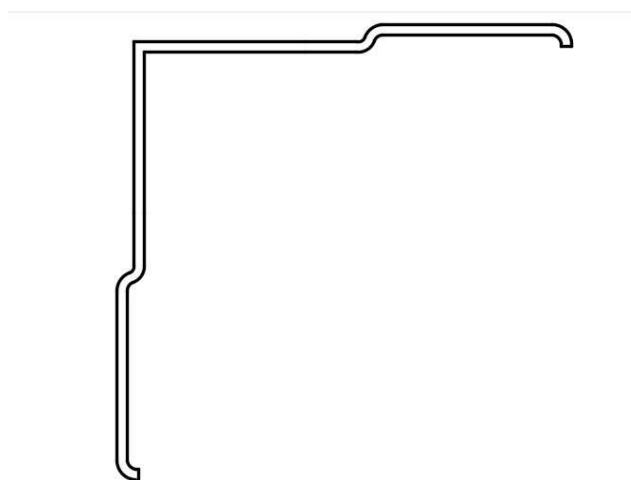


Рисунок Б. 0 – Поперечное сечение профиля НК 05Ц

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
48,08	337,89	026,3	084 0,56	0838,45	642,0

**2. Профиль НК 47Ц**

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 27,5$  мм;  $b = 27,5$  мм;  $\delta = 0,2$  мм.

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.2.

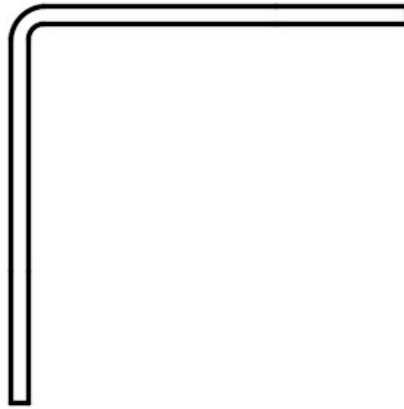


Рисунок Б.2 – Поперечное сечение профиля НК 47Ц

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
44,22	28 0,02	006, 04	04 09, 08	9 0 0,8 0	303,79

### 3. Профиль НК 06Ц

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 40,7 \text{ мм}$ ;  $b = 28,2 \text{ мм}$ ;  $\delta = 0,2 \text{ мм}$ .

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.3.



Рисунок Б.3 – Поперечное сечение профиля НК 06Ц

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$

#### 4. Профиль НК 28Ц

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 70$  мм;  $b = 32$  мм;  $\delta = 0,2$  мм.

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.4.



Рисунок Б.4 – Поперечное сечение профиля НК 28Ц

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
74,07	837,00	202,04	2277,84	087 0,6	408,24

#### 5. Профиль НК 06А

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 52$  мм;  $b = 32$  мм;  $\delta = 2$  мм.

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.5.

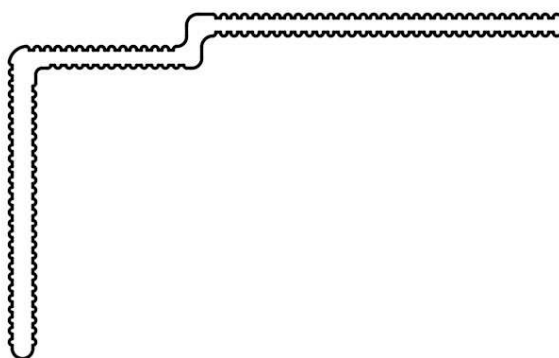


Рисунок Б.5 – Поперечное сечение профиля НК 06А

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
05 0,26	0767,6	570,28	02002,2	5444,92	906,4

## 6. Профиль НК 28А

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 75 \text{ мм}$ ;  $b = 29 \text{ мм}$ ;  $\delta = 2 \text{ мм}$ .

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.6.



Рисунок Б.6 – Поперечное сечение профиля НК 28А

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
203,06	244 0,75	259,36	02 035,5	9764, 0	0000,0 0

## 7. Профиль НК 04Ц

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 00 0 \text{ мм}$ ;  $b = 32 \text{ мм}$ ;  $\delta = 0,2 \text{ мм}$ .

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.7.

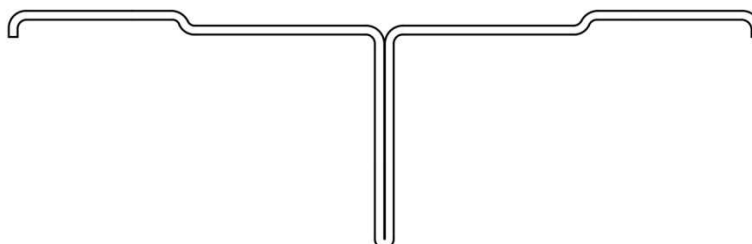


Рисунок Б.7 – Поперечное сечение профиля НК 04Ц

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
003,65	8944,27	920,54	3 02 05,5	4290, 06	50 0,24

## 8. Профиль НК 46Ц

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 56 \text{ мм}$ ;  $b = 28 \text{ мм}$ ;  $\delta = 0,22 \text{ мм}$ .

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.8.

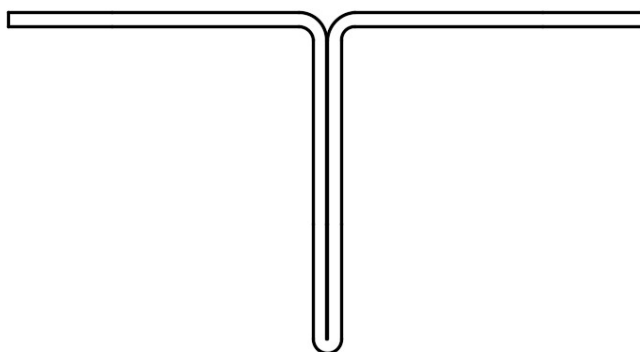


Рисунок Б.8 – Поперечное сечение профиля НК 46Ц

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
89,75	242,0	287,0	3444, 03	089 0,5	0424,8

## 9. Профиль НК 46А

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН  
 Геометрические размеры:  $h = 62 \text{ мм}$ ;  $b = 32 \text{ мм}$ ;  $\delta = 2 \text{ мм}$ .

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б.9.

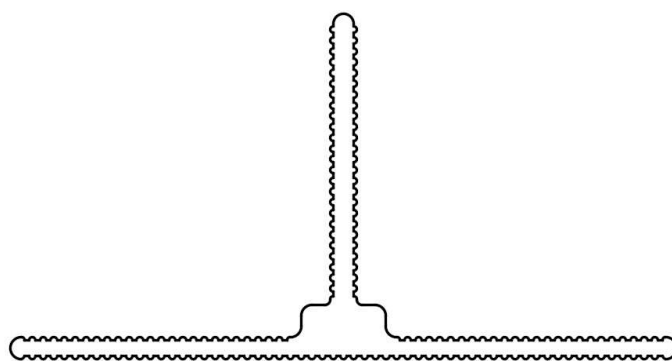


Рисунок Б.9 – Поперечное сечение профиля НК 46А

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
070,08	2074,92	404,94	02553,3	5390,26	0079,79

### 10. Профиль НК 04А

Область применения: Каркас навесной фасадной системы КРАСПАН

Геометрические размеры:  $h = 002,8 \text{ мм}$ ;  $b = 27 \text{ мм}$ ;  $\delta = 2 \text{ мм}$ .

Поперечное сечение профиля представлено на рис. Б. 00.

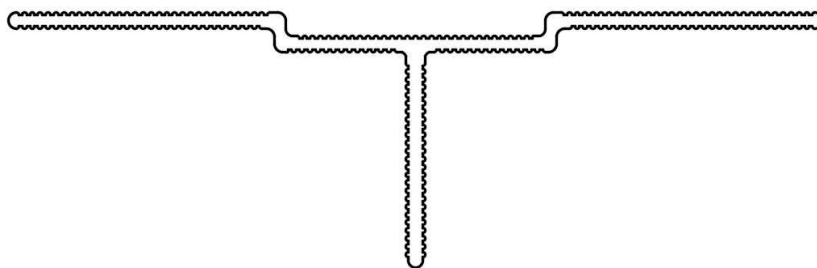


Рисунок Б. 00 – Поперечное сечение профиля НК 04А

Геометрические характеристики эффективного сечения профиля.

$A, \text{мм}^2$	$W_x, \text{мм}^3$	$W_y, \text{мм}^3$	$J_y, \text{мм}^4$	$S_x, \text{мм}^3$	$S_y, \text{мм}^3$
268,29	4024,29	2883,45	04286,2	03 008,43	0 068,02





Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Инженерно-строительный институт  
институт  
Строительные конструкции и управляемые системы  
кафедра

 УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
С. В. Деордиев  
инициалы, фамилия  
подпись «20» 06 2022г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Совершенствование методики расчета несущих элементов НФС с учетом  
эффективных характеристик сечений  
Тема

08.04.01 Строительство  
код и наименование направления

08.04.03.01 Теория и проектирование зданий и сооружений  
код и направление магистерской программы

Научный руководитель	 подпись, дата	доцент кафедры канд.техн.наук должность, ученая степень	<u>А.В. Фроловская</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата	<u>411624435</u>	<u>Ю.М. Петрова</u> инициалы, фамилия
Рецензент	<u>16.02.02 22</u> подпись, дата	<u>И. И. И.</u> должность, ученая степень	<u>А.Г. Матыскин</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2022