

Исследование напряженно-деформированного состояния прогонов из холодногнутых открытых профилей

Хаютин Л.Е.

Научный руководитель: Згировский А.И.

Белорусский национальный технический университет

Данная статья посвящена оценке несущей способности прогонов из тонкостенных холодногнутых открытых профилей – системы покрытия на основе тонкостенных холодногнутых открытых профилей (ТХОП) под действием равномерно-распределенной нагрузки.

Сегодня на строительном рынке представлены различные варианты устройства систем покрытия зданий. Среди множества конструктивных решений можно выделить системы на основе тонкостенных холодногнутых открытых профилей (ТХОП), в частности с использованием Z- и С-образных профилей.

Для заказчика преимуществами данных систем является существенно меньшая масса конструкций и повышенная коррозионная стойкость. Так же стоит отметить высокую степень автоматизации и простоты изготовления ЛСТК (легкие стальные тонкостенные конструкции).

Наблюдается широкая распространенность ТХОП, однако применение ЛСТК требует определенных знаний. Возможность нормативно закрепленного расчета появилась только в 2009 году с введением Еврокодов на территории Беларуси. Часто встречается, что в конструкции используют тонкостенный элемент, а его расчет ведут по СНиП II-23-81 без учета эффективных (редуцированных) характеристик. Это приводит к тому, что реальная несущая способность сечения гораздо ниже расчётной.

Одним из минусов Еврокодов является отсутствие ярко выраженной методики расчетов, которую можно увидеть в СНиП. Существующие пояснительные книги, методические пособия, публикации слабо представлены на русском языке.

Различают два метода изготовления холодноформованных элементов: метод холодной прокатки и метод гибки и штамповки.

Наибольшее распространение имеют элементы, изготовленные методом холодной прокатки. Через станок, оборудованный системой

роликовых валов, пропускается плоский лист металла из бухты, который в конце принимает проектную форму. Преимущество метода в высокой производительности.

Этот метод гибки и штамповки позволяет изготавливать элементы разного сечения без перенастройки прессы, позволяет изготавливать элементы большей толщины (3-6 мм), а также позволяет выполнить меньший радиус закругления, что увеличивает несущую способность элемента.

Исследования, которые проводились в США, показали, что в результате холодного формования изменяются свойства стали по отношению к плоскому листу. В зонах гибки происходит увеличение предела текучести и временного сопротивления стали. Этот эффект учитывается, например, при расчете растянутых элементов, путем использования среднего значения предела текучести, которое выше основного предела текучести.

Холодноформованные элементы условно разделяют на линейные элементы с Z, П, С, Ω-образным сечением либо панели и настилы. Применяется в виде балок, ригелей, прогонов, колонн, а также в виде элементов покрытия или облицовочных элементов.

Среди преимуществ холодноформованных конструкций следует отметить легкий вес, быстроту изготовления, высокую скорость строительства. К недостаткам можно отнести более сложную работу тонкостенных элементов под нагрузкой в сравнении с прокатными профилями, что требует высокой квалификации проектировщиков.

Следует отметить особенности работы тонкостенного профиля:

- возможность потери местной устойчивости полок и стенок профилей при продольном сжатии, если соотношение их ширины и толщины превышает предельное значение;
- возможность возникновения эффекта сдвигового запаздывания (shear lag effect), т.е. неравномерного распределения по ширине сечения профиля нормальных напряжений;
- изгибаемые и сжатые стержни несимметричного сечения работают с кручением;
- поперечные сечения тонкостенных стержней не остаются жесткими, а деформируются, особенно в местах приложения сосредоточенных сил.

Таблица 1

Виды потери устойчивости тонкостенного стержня

Уровень	Форма потери устойчивости (русский термин)	Форма потери устойчивости (английский термин)
Стержень ¹⁾	Изгибная	Flexural buckling
	Крутильная	Torsional buckling
	Изгибно-крутильная	Torsional flexural buckling
	Устойчивость плоской формы изгиба	Lateral-torsional buckling
Пояс, стенка	<i>Устойчивость формы сечения</i>	Distorsional buckling
Плоский участок пояса, стенки	Местная устойчивость	Local buckling

Таблица 2

Потеря устойчивости на уровне «стержень» – потеря общей устойчивости (overall buckling).

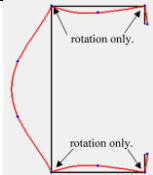
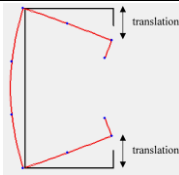
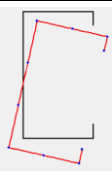
	1	2	3
Название	Местная потеря устойчивости	Потеря устойчивости формы сечения	Потеря общей устойчивости (по Эйлеру) При изгибе – потеря плоской формы изгиба
Формы	Различные (зависят от вида поперечного сечения)	Различные (зависят от вида поперечного сечения)	Изгибная Крутильная Изгибно-крутильная
	Не приводят к перемещению угловых точек сечения	Приводят и не приводят к перемещению угловых точек сечения	Приводят к перемещению угловых точек сечения
	Приводят к искажению плоских частей сечения	Приводят к искажению некоторых плоских частей сечения	Плоские части сечения не искажаются, а сечение смещается и поворачивается
Рисунок			
Длина волны	Не превышает размер поперечного сечения	Соизмерима с габаритами сечения	Соизмерима с длиной профиля



Рисунок 1 – Потеря местной устойчивости сжатого пояса профиля без элементов жесткости при изгибе

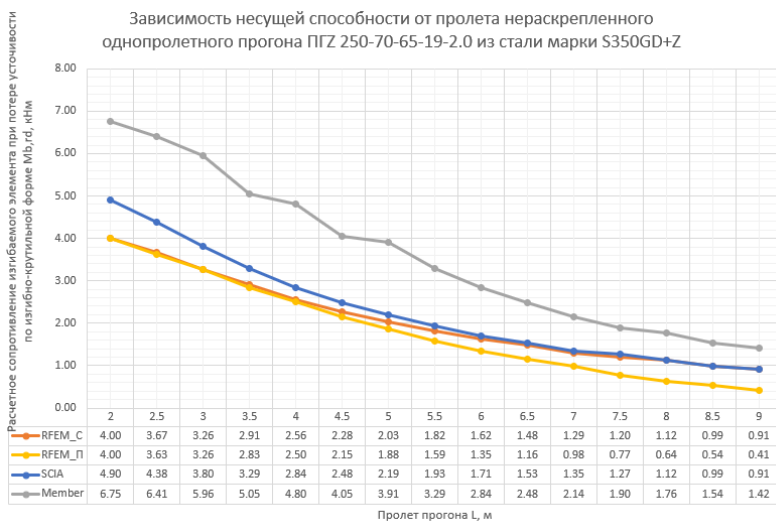


Рисунок 2 – Критический момент потери устойчивости Z-образного прогона

Для выполнения расчетов тонкостенных профилей были отобраны наиболее популярные среди проектировщиков программы,

предоставляющие простой для понимания пользователя интерфейс, множество вариантов тонкой настройки расчетных параметров и позволяющие проводить расчеты по нормативной документации различных стран (ANSI, EN, ТКП, СНиП и т.д.), в частности: Dlubal RFEM (стержневой и пластинчатый расчеты), IdeaStatica (пластинчатый расчет) и SCIA Engineer (стержневой расчет).

Стержневые расчеты относятся к оценке напряжений, деформаций, устойчивости и прочности стержневых элементов, таких как балки, стойки, колонны. Эти расчеты включают определение максимальных напряжений, оценку критических нагрузок и проверку соответствия материала и конструкции установленным стандартам и нормам.

Пластинчатые расчеты подразумевают разделение сечения на набор поверхностей разбитых на сетки конечных элементов, с последующей оценкой поведения и прочности плоских элементов, таких как пластины, оболочки и другие двумерные конструкции. Они включают анализ напряжений, деформаций, устойчивости и других характеристик, необходимых для обеспечения надежности и безопасности конструкции.

В качестве рассматриваемых сечений были выбраны наиболее распространенные в практическом применении С- и Z-образные профили по ТУ ВУ 691607213.001-2018.

Расчетная схема представляет собой однопролетный прогон с шарнирно неподвижной опорой с одной стороны и с шарнирно подвижной опорой со второй стороны. Раскрепления из плоскости рамы отсутствуют. Пролеты прогонов приняты в диапазоне от 2 м до 9 м с шагом исследования в 0.5 м.

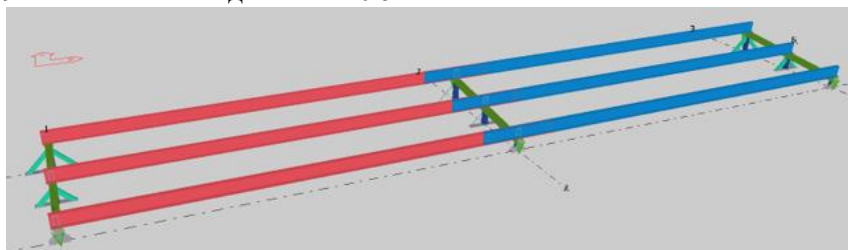


Рисунок 3 – Общий вид исследуемого фрагмента покрытия

Для Z-образного профиля была рассмотрена одна расчетная ситуация с равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к верхней полке сечения.

Для С-образного сечения было рассмотрено 2 расчетные ситуации: в первой нагрузка, как и в случае с Z-образным сечением, была приложена к верхней полке профиля; во втором случае равномерно распределенная нагрузка прикладывалась к нижней полке профиля, являясь стабилизирующей.

Для численных исследований использовался программный комплекс IdeaStatica, который представляет собой инженерное программное обеспечение для расчета и проверки узлов, сечений, элементов и других деталей строительных конструкций по нормам. Особенностью программного комплекса является использование в расчете компонентного метода конечных элементов (КМКЭ). Он сочетает в себе сильные стороны Компонентного метода и Метода конечных элементов. Принцип метода заключается в использовании верифицированных зависимостей из Компонентного метода, в сочетании с вычислением напряжений в отдельных компонентах посредством конечно-элементного моделирования. Для расчета и проектирования данных типов конструкций IDEA StatiCa предлагает следующие модули: IDEA StatiCa Steel Connection для проверки узлов стальных конструкций любой топологии и IDEA StatiCa Steel Member для решения комплексных вопросов, связанных с устойчивостью элементов. Модуль IDEA StatiCa Steel Member включает в себя модуль IDEA StatiCa Steel Connection, позволяя проводить расчет конструкции с учетом несущей способности не только основного элемента, но и его узлов примыкания к другим фрагментам конструкции.

Проведение расчетов в программном комплексе Idea StatiCa разделяется на 3 этапа, каждый из которых представляет собой отдельную методику расчета конструкции. Этапы включают в себя:

- физический нелинейный расчет (ФНР);
- линейный расчет устойчивости (ЛРУ);
- геометрический и физический нелинейный расчет с учетом начальных несовершенств.

Ввиду отсутствия возможности автоматического расчета максимальной несущей способности конструкции, критическая нагрузка подбирается итерационным способом, вплоть до прекращения выполнения любого из критериев несущей способности.

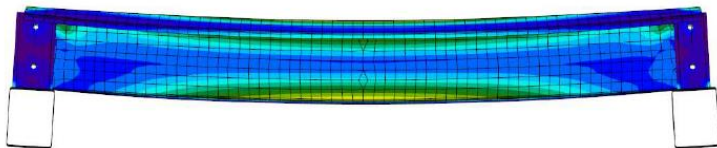


Рисунок 4 – Распределение напряжений на Z-образном прогоне пролетом 2 м при проведении физически нелинейного расчёта

На этапе линейного расчета устойчивости критерием несущей способности является коэффициент критической нагрузки, отражающий величину, на которую возможно увеличить приложенную нагрузку до потери устойчивости рассматриваемого элемента. Так же он отражает возможные формы потери устойчивости, начиная с наиболее вероятной (рисунок 5).

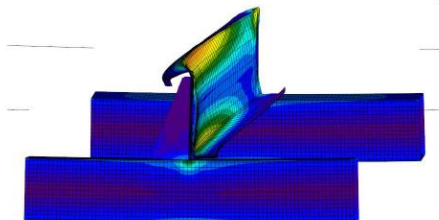


Рисунок 5 – Первая форма потери устойчивости Z-образного прогона пролетом 2 м при проведении линейного расчёта устойчивости. Потеря устойчивости формы сечения (верхней полки).

Результаты расчета ЛСТК прогонов в ПК Idea StatiCa, отраженные совместно с результатами расчетов в иных программных комплексах и отраженные в виде таблиц и графиков несущей способности позволяют сделать следующие выводы:

1. Критерий несущей способности изменяется в зависимости от пролета рассматриваемых прогонов, благодаря чему может быть выведена следующая закономерность:

– Значение критических моментов потери устойчивости по изгибно-крутильной форме возрастает вплоть до пролета в 5 м. Данный факт обусловлен тем, что у прогонов малых пролетов наблюдается потеря устойчивости формы сечения (отгиб плоскости полки, к которой приложена нагрузка). При повышении нагрузки выше полученных значений перестает достигаться сходимость расчета ввиду критических значений перемещений точек поперечного сечения.

– Потеря устойчивости прогонов пролетом свыше 6 метров диктуется линейным расчетом устойчивости. Наблюдается изгибно-крутильная форма потери общей устойчивости сечения (коэффициенты критической нагрузки равны или близки к 1.0).

2. Природа отраженных на графике критических моментов потери устойчивости по изгибно-крутильной форме скачков не установлена. Данные неточности возникают при проведении расчета с учетом начальных геометрических несовершенств конструкции и, возможно, являются следствием учета случайности отклонений конструкции, однако ввиду отсутствия графического отображения графика сходимости в процессе расчета и невозможности получить детальные подробности методики, применяемой решателем, точный вывод о причине и природе данного явления сделать не представляется возможным.

Учитывая изложенное в пункте 2 и тот факт, что разработчики программы не рекомендуют использовать ее для расчета тонкостенных профилей, несмотря на реализацию в программе всех необходимых для этого инструментов, можно сделать вывод о нецелесообразности ее использования для проектирования и расчета ЛСТК, даже принимая во внимание все ее преимущества для проектировщика.

Список использованных источников

1. ТКП ЕН 1993–1–3–2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодногнутых элементов и профилированных листов. Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2009.

2. ТКП ЕН 1993–1–1–2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2009.

3. ТКП ЕН 1993–1–5–2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2009.