

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВ В РАСЧЕТАХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МКЭ

**В. В. Надольский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии строительного производства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : Nadolski@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены подходы к моделированию несовершенств в холодноформованных стальных конструкциях при численном анализе. Показано, что в отличие от сварных и прокатных элементов, для которых возможно применение эквивалентных несовершенств, холодноформованные профили требуют отдельного учета геометрических и структурных несовершенств. Обоснована необходимость анализа различных комбинаций форм потери устойчивости на уровне сечения и элемента для выявления наиболее неблагоприятных сценариев. Отмечено, что комбинирование эквивалентных несовершенств в двух взаимно перпендикулярных направлениях не является обязательным. В качестве перспективных направлений исследований выделено развитие методик прямого моделирования геометрических и эквивалентных несовершенств холодноформованных элементов с целью более точного определения несущей способности.

**Предмет исследования:** работа посвящена моделированию несовершенств в холодноформованных стальных конструкциях. Существующие подходы к моделированию несовершенств для сварных и прокатных элементов недостаточно учитывают геометрию и технологические особенности тонкостенных профилей.

**Цель:** разработка подходов к учёту несовершенств холодноформованных элементов для прогнозирования несущей способности.

**Материалы и методы:** анализ и систематизация результатов аналитического обзора литературы.

**Результаты:** Показано, что главным фактором являются геометрические несовершенства, тогда как мембранными остаточными напряжениями можно пренебречь. Обоснована необходимость анализа нескольких форм потери устойчивости и их комбинаций.

**Выводы:** На основании проведенного анализа можно заключить, что пренебрежение остаточными напряжениями при численном моделировании холодногнутых профилей в большинстве исследований является методологически обоснованным, однако требует верификации и валидации на основе экспериментальных данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Поведение и несущая способность холодноформованных тонкостенных конструкций в значительной степени определяются влиянием начальных несовершенств. К ним относятся как геометрические отклонения, так и структурные неоднородности материала, например, остаточные напряжения, возникающие в

процессе формования. Учет этих факторов является критически важным для получения достоверных результатов при численном моделировании.

Актуальность задачи возросла в последние десятилетия в связи с интенсивным развитием и повсеместным внедрением методов компьютерного численного моделирования в практику расчетов. Однако отсутствие единой методологии задания несовершенств, как по форме, так и по амплитуде, на уровне элемента и сечения остается пробелом, требующим решения. Существующие нормативные документы (например, ТКП EN 1993-1-3) предлагают общие принципы, которые зачастую нуждаются в адаптации и уточнении для сложных случаев нагружения и форм сечений.

В исследовании представлены результаты аналитического обзора исследований по моделированию несовершенств холодноформованных конструкций применительно к анализу несущей способности на основе компьютерного численного моделирования. Основное внимание уделяется систематизации подходов к учету геометрических и структурных несовершенств в рамках численного анализа методом конечных элементов. Целью работы является формулировка рекомендаций и принципов для повышения точности и надежности расчетных моделей.

## **ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ**

Исследование поведения холодноформованных тонкостенных конструкций при статическом нагружении неразрывно связано с учётом начальных несовершенств, которые существенно влияют на несущую способность и формы потери устойчивости. В научной литературе отмечается, что определяющими факторами являются как геометрические отклонения от проектной формы, так и остаточные напряжения, возникающие в процессе холодной формовки. Численный анализ холодноформованных конструкций может выполняться с применением методики задания несовершенств, аналогичной той, что используется для сварных и прокатных элементов [1]. Однако в исследованиях по холодноформованным конструкциям несовершенства обычно рассматриваются несколько иначе, особенно в случае оболочечных конечно-элементных моделей, разработанных для прямого прогнозирования предельного значения несущей способности конструкции, элемента или детали.

Современные работы демонстрируют широкий спектр подходов к заданию геометрических несовершенств. Обзор [2] показывает, что методы варьируются от использования форм потери устойчивости, полученных в результате линейного бифуркационного анализа, до прямого переноса измеренных форм несовершенств. Подчеркивается, что амплитуда и форма несовершенств существенно влияют на предельную нагрузку для тонкостенных профилей.

В ряде исследований внимание уделяется остаточным напряжениям. Результаты исследования [3] позволяют аналитически предсказывать напряжённое состояние угловых зон при упруго-идеально-пластической модели материала, что облегчает учёт этих эффектов в численных расчётах. Экспериментальные измерения с использованием методов рентгеновской дифракции [4] подтверждают значительную неравномерность распределения остаточных напряжений по толщине и периметру сечения.

Особое внимание уделяется исследованию взаимного влияния форм несовершенств. В работах [5] и [6] показано, что комбинации различных форм несовершенств (местных, сечений, элементов) приводят к значительным различиям в результатах численного анализа. Это подтверждает необходимость анализа нескольких возможных форм потери устойчивости и выбора наихудшего сценария.

В исследовании [7] предложен инновационный подход, основанный на интеграции данных экспериментальных измерений в конечно-элементные модели, что позволило повысить точность оценки несущей способности элементов. Параллельно ведутся работы по верификации численных моделей с результатами экспериментальных испытаний [8].

Таким образом, анализ литературы показывает, что, несмотря на значительный прогресс в области моделирования холодноформованных конструкций, остаётся ряд нерешённых вопросов. В первую очередь это касается согласованного выбора амплитуды и формы несовершенств, а также комплексного учёта остаточных напряжений. Эти аспекты являются ключевыми для разработки надёжных методик расчёта и требуют дальнейшего развития как на экспериментальном, так и на численном уровнях.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В качестве объектов моделирования рассматривались холодноформованные тонкостенные профили, наиболее часто применяемые в строительной практике (С-образные, Z-образные и  $\Sigma$ -образные сечения). Методы исследования анализ и систематизация результатов аналитический обзор литературы.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Анализ показал, что в большинстве исследований холодноформованных профилей моделируются преимущественно геометрические несовершенства, тогда как остаточными напряжениями полностью или частично пренебрегают.

С одной стороны, предполагается, что отрицательное влияние мембранных остаточных напряжений компенсируется положительным влиянием холодной формовки на предел текучести. Поэтому мембранные остаточные напряжения, как правило, не учитываются. С другой стороны, влияние изгибных (по толщине) остаточных напряжений считается либо несущественным, либо предполагается, что оно учитывается через график деформирования материала, который должен быть получен в результате испытаний образцов, извлечённых после процесса формования.

Для описания материала рекомендуется применять четырёхлинейную диаграмму напряжение–деформация с пределом текучести ( $f_y$ , МПа), равным номинальному пределу текучести. Эта кривая может быть упрощена до билинейной кривой ( $E_1=E_2=E$  и  $E_3=E/100$ ), если доминирующей формой потери устойчивости является изгибная или изгибно-крутильная потеря устойчивости элемента. Повышение предела текучести вследствие холодной формовки можно рассматривать только при соблюдении условий, указанных в EN1993-1-3 (п. 5.2.2 (4)). В этом случае кривая материала с  $f_y$  выше номинального предела текучести может быть определена для зонгиба поперечных сечений в конечно-элементной модели оболочки. Несколько исследований были посвящены измерению увеличения предела текучести, вызванного процессом формования, которые показали,

что увеличение обычно составляет от 5 % до 40 % [9, 10] и может быть использовано для определения значения предела текучести на изгибах. В некоторых конкретных ситуациях (см. EN1993-1-3 п. 5.2.2 (4)) допускается учитывать положительное влияние холодной формовки на предел текучести путем использования так называемого среднего предела текучести. Однако этот эффект учитывается только при проверке конструкции посредством формульных моделей сопротивления (см. EN1993-1-3 п. 5.2.2 (3)).

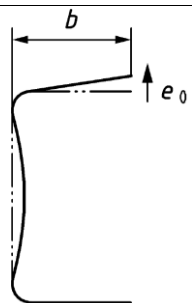
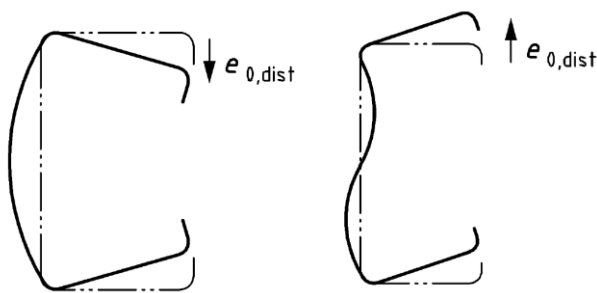
Применяемые геометрические несовершенства могут быть основаны на измеренных значениях или производственных допусках. Значения общих (поперечное отклонение) несовершенств холодноформованных конструкций могут быть установлены в соответствии со стандартом EN1993-1-3 аналогично конструкциям, выполненным из прокатных или сварных профилей.

Формы несовершенств сечения для холодноформованных конструкций назначаются на основании форм потери устойчивости, полученных посредством линейного расчета на устойчивость (бифуркационного анализа) [2]. Иногда формы потери устойчивости показывают комбинацию различных форм потери устойчивости сечения и элемента [7, 8]. Необходимо выбрать наименьшую доминирующую форму потери устойчивости, соответствующую исследуемому несовершенству. Тем не менее, рекомендуется исследовать несколько наименьших форм потери устойчивости, соответствующих изучаемому несовершенству, и применять ту, которая приводит к наиболее неблагоприятному эффекту.

Если полка имеет подкрепление (свес), то рекомендуется рассматривать альтернативно две формы несовершенств: местное несовершенство полки, несовершенство формы сечения. К краевому ребру жесткости обычно отдельно не прикладывают несовершенство, так как местное несовершенство полки, основанное на форме потери устойчивости, уже будет включать поворот ребра жесткости.

Наиболее типичные формы несовершенств С-образного сечения представлены в таблице 1.

Табл. 1. Типичные формы несовершенств С-образного сечения

| Несовершенство | Форма несовершенства   | Амплитуда  |
|----------------|--|--|
| Полки          |   | $b/125$  |
| Формы сечения  |  | $0.3 \cdot t \cdot \sqrt{(f_{yb}/\sigma_{cr,dist})}$ |

Значение несовершенства для потери устойчивости формы сечения предложено на основании исследования [11, 12]. В общем виде значение геометрического несовершенства может быть определено согласно следующему выражению:

$$e_{0,dist} = 0.3 \cdot t \cdot \sqrt{(f_{yb} / \sigma_{cr,dist})} \quad (1)$$

$f_{yb}$  – основной предел текучести в соответствии с EN 1993-1-3,

$\sigma_{cr,dist}$  – упругое критическое напряжение потери устойчивости формы сечения.

Рекомендуется, чтобы  $\sigma_{cr,dist}$  было равно минимальному критическому напряжению потери устойчивости формы сечения (как правило, соответствует форме деформирования стенки по полусинусоиде [12]). Следовательно, значение несовершенства формы сечения одинакова для любой длины элемента. Условия закрепления на конце элемента должны допускать депланацию концевых сечений, но не искажение формы сечения (потеря устойчивости формы сечения должна исключаться).

## ВЫВОДЫ

Высокая степень взаимодействия различных форм потери устойчивости в холодноформованных стальных конструкциях требует анализа возможных комбинаций несовершенств частей и формы поперечного сечения с целью выявления наиболее неблагоприятного сценария. При этом рекомендуется также рассматривать сочетания данных несовершенств с несовершенствами на уровне элементов. Вместе с тем комбинирование эквивалентных несовершенств элемента в двух взаимно перпендикулярных направлениях не является необходимым.

На основании проведенного анализа можно заключить, что пренебрежение остаточными напряжениями при численном моделировании холодногнутого профиля в большинстве исследований является методологически обоснованным, однако требует верификации и валидации на основе экспериментальных данных. Это положение опирается на следующие ключевые аргументы:

1. **Эффект компенсации для мембранных напряжений.** Существует научно обоснованное предположение, что отрицательное влияние мембранных остаточных напряжений (снижающих несущую способность) компенсируется положительным эффектом от упрочнения материала в процессе холодной деформации. Последнее приводит к увеличению предела текучести в угловых зонах профиля, что в среднем для сечения дает нейтральный или даже положительный эффект.
2. **Пренебрежимо малое влияние изгибных напряжений.** Влияние изгибных (градиентных по толщине) остаточных напряжений считается несущественным для общего поведения и несущей способности тонкостенного элемента. Их локальный эффект не оказывает решающего воздействия на глобальные формы потери устойчивости.
3. **Косвенный учет через свойства материала.** Наиболее важным является тот факт, что влияние процесса формования на механические свойства материала уже учтено в диаграмме деформирования ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), если она была получена в результате испытаний образцов, вырезанных из готового профиля. Таким образом, результирующие свойства материала включают в себя интегральный

эффект от наклепа и остаточных напряжений, что делает их явное моделирование избыточным для большинства практических задач.

В качестве направления дальнейших исследований целесообразно выделить разработку подходов к учёту геометрических и эквивалентных несовершенств холодноформованных элементов при прямом определении их несущей способности. Следует подчеркнуть, что существующие методики задания эквивалентных несовершенств, применяемые для прокатных и сварных профилей, не могут быть напрямую использованы для холодноформованных элементов, поскольку они не учитывают специфические геометрические и технологически обусловленные структурные несовершенства, характерные для тонкостенных холодноформованных профилей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Надольский В.В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 45–56.
2. Aktepe R., Erkal B. G. State-of-the-art review on measurement techniques and numerical modeling of geometric imperfections in cold-formed steel members // Journal of Constructional Steel Research. – 2023. – Vol. 207. – P. 107942.
3. Chinnaraj K., Padmanaban R. Analytical prediction of residual stresses in cold-formed steel sections with elastic-perfectly plastic material model // SAE Technical Papers. – 2017. – № 2017-26-0169.
4. Petukhovskaia I., Saremi P., Lu W., Puttonen J. Residual stresses in cold-formed square hollow section of high strength steel // Aalto University Dissertation. – Espoo, Finland, 2023. – 142 p.
5. Portioli D., D'Amico B., Di Lorenzo A., Landolfo R. Modelling of geometric imperfections in numerical simulations of built-up cold-formed steel beams // Napier University Reports. – 2010.
6. Garifullin M., Nackenhorst U. Computational analysis of cold-formed steel columns with initial imperfections // Thin-Walled Structures. – 2015. – Vol. 91. – P. 60–73.
7. Çağrıçı Ö. G., Aktepe R., Erkal B. G. Novel imperfection method for post-buckling strength of C-sectioned CFS members // Turkish Journal of Civil Engineering. – 2023. – Vol. 31, № 1. – P. 45–63.
8. Ostrava P., et al. Verification of numerical models of high thin-walled cold-formed steel purlins // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 17. – P. 4392.
9. Put B.M., Trahair N. Lateral buckling tests on cold-formed channel beams // Journal of Structural Engineering-asce. – 1999. – Vol. 125. – P.532-539
10. Bonada J., Pastor-Artigues M., Roure F., Casafont M. Influence of the cold work effects in perforated rack columns under pure compression load // Engineering Structures. 2015. – Vol. 97.
11. Lecce M., Rasmussen K. Distortional Buckling of Cold-Formed Stainless Steel Sections: Finite-Element Modeling and Design // Journal of Structural Engineering. – 2006. – Vol. 132(4). – P. 505–514.
12. Seek M., Avci O. Evaluation of local and distortional buckling strength of purlins with paired torsion bracing using Direct Strength Method // Journal of Constructional Steel Research. – 2023. – Vol. 203. – Paper 107698.