

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВ В РАСЧЕТАХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МКЭ

В. В. Надольский¹

¹ 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 пре-небречь. Обоснована необходимость анализа нескольких форм потери устойчивости и их комбинаций.

Выходы: 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 ЕН 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. Подчёркивается, 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 Σ -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, извлеченных 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 доминирующий формой потери устойчивости является изгибная или изгибо-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 зон гиба 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)).

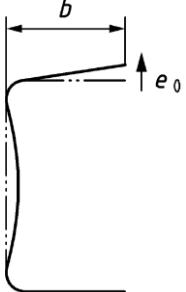
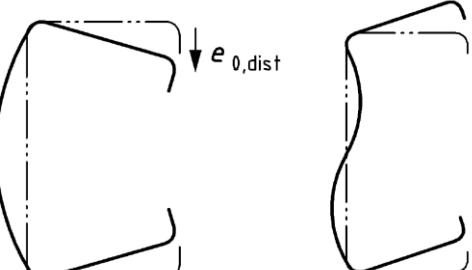
Применяемые геометрические несовершенства могут быть основаны на измеренных значениях или производственных допусках. Значения общих (поперечное отклонение) несовершенств холодноформованных конструкций могут быть установлены в соответствии со стандартом EN1993-1-3 аналогично конструкциям, выполненным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

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

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 холоднодеформированных 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 холодногнутых профилей 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 (σ - ϵ), если она была получена в результате испытаний образцов, вырезанных из готового профиля. Таким образом, результирующие свойства материала включают в себя интегральный

эффект от наклена 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 холоднодекорированных 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 холоднодекорированных элементов, поскольку они не учитывают специфические геометрические и технологические обусловленные структурные несовершенства, характерные для тонкостенных холоднодекорированных 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. Petukhovskaya 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. Çağrıci 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.