

ПРОГРАММА РАСЧЁТА ПРОГИБОВ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

В последнее время в России наблюдается заметный рост применения в строительстве стальных тонкостенных холодногнутых профилей из оцинкованной стали [1], что объясняется рядом достоинств конструкций из таких профилей. Среди них можно отметить малый удельный вес, скорость и всесезонность монтажа, экологичность, широкие архитектурные возможности. Из таких профилей изготавливаются как лёгкие несущие, так и ограждающие конструкции.

Однако более широкому применению этих профилей препятствует отсутствие адаптированной методики расчёта и должного опыта проектировщиков.

Особенностью рассматриваемых профилей является их тонкостенность. Как следствие, помимо общей потери устойчивости конструкции или её элемента весьма вероятны местная потеря устойчивости компонентов профиля (пояс, стенка, отгиб), а также потеря устойчивости формы сечения (рис. 1). Под местной потерей устойчивости понимается выпучивание отдельных участков пластин, составляющих профиль, под действием сжимающих нормальных и/или касательных напряжений без смещения линий сопряжения пластин (линийгиба). При потере устойчивости формы сечения поперечные деформации охватывают две смежные пластины и происходит смещение линиигиба обычно между сжатым поясом (поясами) и отгибом, что приводит к изменению формы сечения [2].

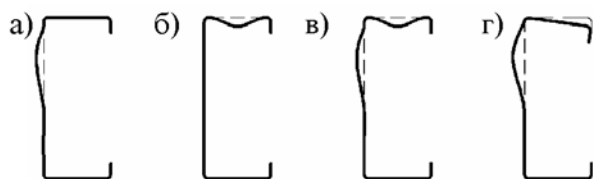


Рисунок 1 — Формы потери устойчивости изгибаемого элемента из тонкостенного холодногнутого профиля С-образного сечения (помимо глобальных форм): а) местная потеря устойчивости стенки; б) местная потеря устойчивости пояса; в) местная потеря устойчивости пояса и стенки; г) потеря устойчивости формы сечения

В дальнейшем будем считать, что общая потеря устойчивости изгибаемого элемента исключена конструктивными мероприятиями, например, надёжным креплением стального профилированного настила, который при определённых условиях можно считать достаточной опорой в горизонтальном направлении для сжатого пояса изгибаемого элемента [3,4]. Кроме того, конструктивно обеспечена местная устойчивость стенки на опорах и в местах возможного приложения сосредоточенных сил. Вариант перекрытия с применением в качестве несущих конструкций балок из тонкостенных холодногнутых профилей из оцинкованной стали приведён на рис. 2.

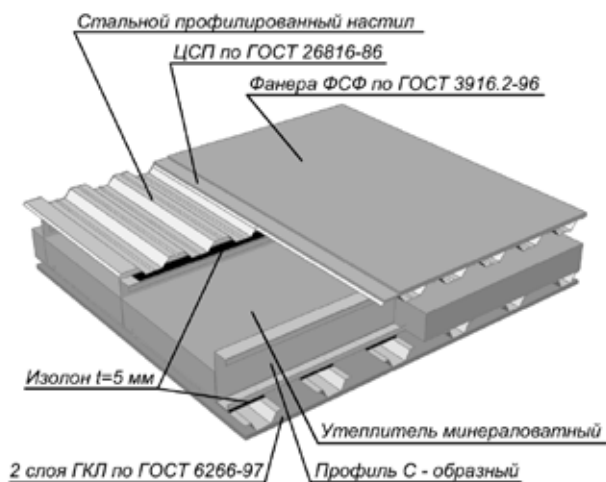


Рисунок 2 — Вариант перекрытия с применением балок из тонкостенных холодногнутых оцинкованных профилей

Известно, что потерявшая местную устойчивость пластинка способна воспринимать возрастающую нагрузку [5]. Иными словами, она и, следовательно, профиль, состоящий из отдельных пластин, обладают критической несущей способностью, причём часто довольно значительной. Кроме того, профиль, в котором произошла потеря устойчивости формы сечения, также может воспринимать дополнительную нагрузку, хотя и меньшую, чем при местной потере устойчивости [2]. Поэтому зарубежные нормы проектирования конструкций из стальных тонкостенных профилей [4,6] не рассматривают местную потерю устойчивости и потерю устойчивости формы сечения за предельное состояние и допускают критическую работу таких стержней.

Отечественные нормы проектирования стальных конструкций [7,8] также не исключают критическую работу стержней после потери местной устойчивости одного из компонентов профиля (например, стенки сжатого элемента). Но строительной методикой расчёта тонкостенных профилей (во всём многообразии форм поперечных сечений) после потери местной устойчивости в зависимости от уровня нагруженности они не предоставляют. А потеря устойчивости формы сечения даже не упоминается.

Расчёт изгибаемых элементов (балок, прогонов) по предельным состояниям предполагает в том числе и расчёт по прогибам.

При определённом уровне загрузки тонкостенного изгибаемого элемента в наиболее нагруженном сечении (сечениях) может произойти потеря местной устойчивости либо пояса, либо стенки, или же отгиб (при его наличии). С нарастанием нагрузки зоны выпучивания в потерявших местную устойчивость компонентах профиля расширяются. Кроме того, могут потерять устойчивость до сих пор устойчивые компоненты. Нагружение продолжается до уровня нагрузки, при котором необходимо определить прогиб конструкции.

На рис. 3 представлен изгибаемый элемент после потери местной устойчивости верхнего сжатого пояса и стенки, тем не менее продолжающий воспринимать возрастающую нагрузку. В практике расчётов полагается, что потерявшие устойчивость участки профиля уже не воспринимают нагрузку, и их исключают из работы (рис. 3,г). Таким образом, расчётный стержень будет иметь переменное по длине сечение (рис. 3,д), которое изменяется с нарастанием нагрузки.

Приведённая выше работа изгибаемого элемента реализована в компьютерной программе.

На определённом уровне нагружения выполняется статический расчет конструкции с геометрическими характеристиками полного сечения. Затем в зависимости от уровня нагруженности каждого сечения вычисляются его редуцированные характеристики, которые представляют собой геометрические характеристики сечения, в состав которого включены только участки пластин, сохранившие устойчивость. Редуцирование сечения с учётом потери местной устойчивости и потери устойчивости формы сечения выполняется по Eurocode 3 [4]. Далее выполняется статический расчет конструкции с учетом редукции. В общем случае статически неопределимых систем деформации и усилия зависят от распределения жесткостей в конструкции. Поэтому перечисленные ранее этапы повторяются до тех пор, пока максимальная разница между соответствующим прогибом на предыдущей и на текущей итерациях не будет менее заранее заданного значения. Схема алгоритма работы программы при фиксированной нагрузке приведена на рис. 4.

Описанный выше алгоритм может быть повторён при более высоких уровнях нагружения и таким образом построен график прогибов изгибаемого элемента при поперечном изгибе.

Для статического расчёта в программе предусмотрен модуль, реализующий метод конечных элементов, в котором вся конструкция разбивается на задаваемое пользователем число стержневых конечных элементов различной жёсткости.

Разработанная программа была верифицирована по результатам экспериментальных исследований, проведённых в Сиднейском университете (Австралия) [9]. Эксперименты проводились на С-образных



Рисунок 4 — Схема алгоритма вычисления прогибов при фиксированном уровне нагружения

холодногнутых оцинкованных профилях 150x65x16 и 200x75x17 толщиной 1,5 и 1,9 мм. Предел текучести стали от 485 МПа до 541 МПа. Схема, по которой выполнялись испытания, показана на рис. 5. Проводились две серии испытаний: в первой из них в зоне наибольших изгибающих моментов были предусмотрены конструктивные мероприятия, исключающие потерю устойчивости формы сечения; во второй серии такие отсутствовали и профиль мог терять устойчивость формы сечения.

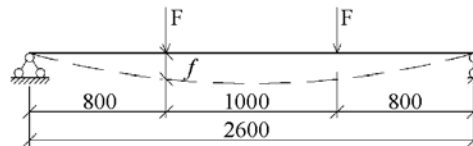


Рисунок 5 — Схема испытаний

На рис. 6 и 7 показаны графики прогибов в месте приложения сосредоточенной нагрузки F для C150, полученные экспериментально [9] и вычисленные по разработанной программе. Из их совместного рассмотрения видно, что расчётные графики довольно

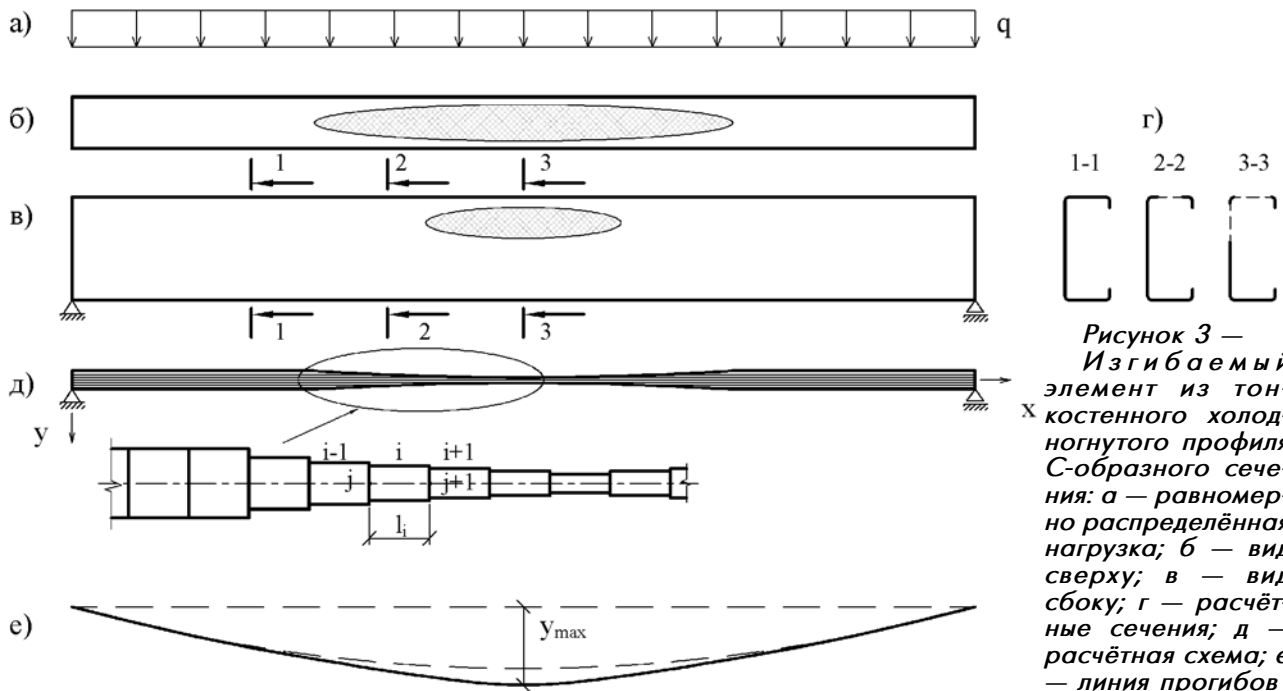


Рисунок 3 — Изгибаемый элемент из тонкостенного холодногнутого профиля С-образного сечения: а — равномерно распределённая нагрузка; б — вид сверху; в — вид сбоку; г — расчётные сечения; д — расчётная схема; е — линия прогибов

хорошо описывают прогибы экспериментальных конструкций. Расхождение при нагрузках, соответствующих расчётному появлению текучести стали в наиболее нагруженных сечениях, составляют от 3,5% в небезопасную сторону в С150х1,9 (без учёта потери устойчивости формы сечения) до 15,8% в запас в С150х1,5 (с учётом потери устойчивости формы сечения).

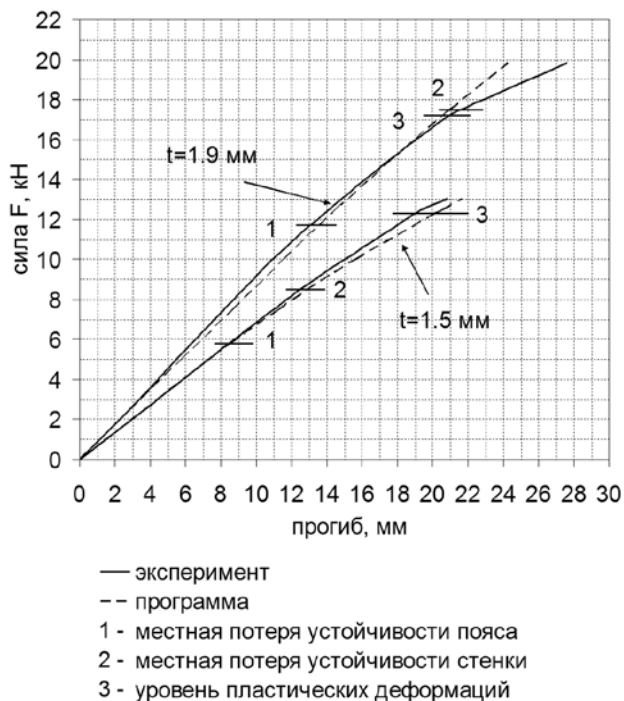


Рисунок 6 — Зависимости «Нагрузка-прогиб» для С150х65х16 (потеря устойчивости формы сечения исключена)

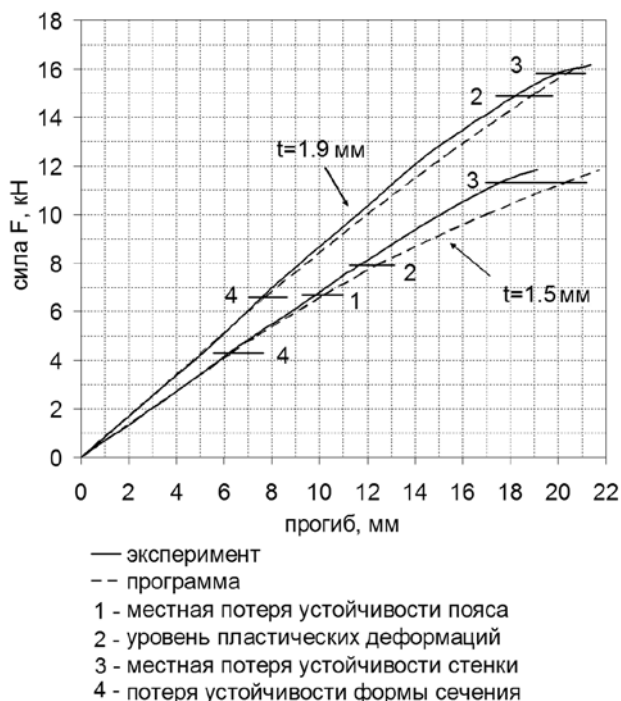


Рисунок 7 — Зависимости «Нагрузка-прогиб» для С150х65х16 с учётом потери устойчивости формы сечения

Заметим, что в случае исключения потери устойчивости формы сечения, первоначально линейные расчётные зависимости после потери местной устойчивости пояса и/или стенки перестают быть линейными и прогибы начинают расти быстрее, что закономерно, и связано с нелинейным снижением момента инерции редуцированного сечения I_{eff} для части поперечных сечений конструкции. Такой характер расчётных зависимостей соответствует нелинейному характеру экспериментальных кривых. В тех случаях, когда не исключалась потеря устойчивости формы сечения, редуцирование сечения, связанное с этим явлением, начиналось значительно раньше и, следовательно, появлялась нелинейность в расчётных графиках, которая в дальнейшем увеличивалась за счёт редукции в результате потери местной устойчивости пояса и/или стенки.

Таким образом, можно заключить, что разработанная компьютерная программа с достаточной для инженерных расчётов точностью описывает прогибы изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутох профилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айрумян, Э.Л. Особенности расчёта стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей / Э.Л. Айрумян // Монтажные и специальные работы в строительстве, 2008.- № 3. — С.2-7
2. Adany, S. Buckling mode classification of members with open thin-walled cross-section by using Finite Strip Method. Research Report / S. Adany // Johns Hopkins University, 2004. — 99 p.
3. Айрумян, Э.Л. Исследования действительной работы тонкостенных холодногнутох прогонов из оцинкованной стали / Э.Л. Айрумян, В.Г. Галстян // Промышленное и гражданское строительство, 2002. — № 6. — С.31-34
4. EN 1993-1-3:2004 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2004. — 125 p.
5. Тимошенко, С.П. Устойчивость упругих систем / С.П. Тимошенко — М.-Л.: Гос. изд-во технической литературы, 1946. — 532 с.
6. NAS (2004): North American Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members / American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., AISI/COS/NASPEC, 2004
7. СНиП II-23-81* Стальные конструкции / Госстрой СССР.-М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 96 с.
8. СП 53-102-2004 Общие правила проектирования стальных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко, 2004
9. Hung, C. Experimental Investigation of High Strength Cold-Formed C-Section in Combined Bending and Shear/ C. Hung, G.J. Hancock // The University of Sydney, 2009, 42 p.

