

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2\(25\)-106-116](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2(25)-106-116)

УДК: 624.014.2

# ИСПЫТАНИЕ СОСТАВНЫХ СТОЕК ИЗ ХОЛОДНОГНУТЫХ С-ОБРАЗНЫХ ПРОФИЛЕЙ

## TESTING OF COMPOUND POSTS OF COLD-BENT C-SHAPED PROFILES

Г. В. НЕФЕДОВ

*Статья посвящена анализу результатов натурных испытаний составных стоек из С-образных холодногнутых профилей. Рассмотрена номенклатура профилей составных стоек, представлена форма приложения нагрузки на испытательные образцы, описаны оборудование и контрольные приборы, с помощью которых выполнялись испытания, а также дано сопоставление результатов эксперимента с результатами численного анализа, в том числе на программном конечно-элементном комплексе ANSYS. Сделаны выводы по результатам испытаний и сопоставления результатов численного анализа и натурального эксперимента. Даны рекомендации для практического проектирования.*

*This article is devoted to the analysis of results of in-kind tests of compound posts from cold-bent C-shaped profiles. The article considers the nomenclature of profiles of compound posts, presents the form of application of load on test samples, the equipment and control devices with which tests were carried out, as well as the comparison of the results of the experiment with the results of numerical analysis, including on the software finite element complex ANSYS. Conclusions were drawn from the results of the tests and comparison of the results of numerical analysis and in-kind experiment. Recommendations for practical design are given.*

### Ключевые слова:

*Жилые дома, технология легких стальных тонкостенных конструкций, холодногнутые оцинкованные профили*

### Key words:

*Cold-rolled galvanized profiles, LSTC technology, residential building*

Скорость возведения, экологичность и экономические преимущества зданий с каркасами из стальных оцинкованных профилей способствуют все большей их популярности. Но малоизученность этих конструкций и отсутствие проработанных норм проектирования сдерживает развитие.

Необходимость исследования работы составных стоек из холодногнутого оцинкованного С-образного профиля была продиктована реализацией проекта жилого многоквартирного

ного шестиэтажного дома на основе каркаса из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК).

Пример реализованного проекта: жилой дом, Калужская область, д. Кривское, сдан в 2018 г. (рис. 1).



Рис.1. Жилой дом, Калужская область, д. Кривское

Одним из вопросов, с которым пришлось столкнуться в процессе проектирования этого объекта, была правильная оценка несущей способности составных стоек из холодногнутых профилей С-образного сечения, объединенных в стеновые панели. Для оценки реальной несущей способности стоек с различными геометрическими размерами сечений проведены развернутые испытания. На основе изложенного в [1] для испытаний выбран ряд профилей с диапазоном толщины от 1,6 до 3,5 мм, шириной полки от 45 до 125 мм и высотой стенки от 150 до 360 мм.

В качестве объектов испытаний приняты стойки составного сечения из С-образных гнутых оцинкованных профилей, установленных стенками друг к другу и объединенных между собой болтовыми соединениями с шагом, равным  $30 i_{ef\min}$ , где  $i_{ef\min}$  – минимальный эффективный радиус инерции (рис. 2).

Испытание образцов стоек проведены на базе лаборатории испытания конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» на гидравлическом прессе МАН-500. Испытания проведены по методике, включающей в себя порядок проведения испытаний с применением контрольно-измерительных приборов, основные положения по интерпретации результатов испытаний и критерии оценки конструкций по предельным состояниям несущей способности и эксплуатационной пригодности при действии кратковременной статической нагрузки [2].

Для закрепления образцов на испытательном стенде и передачи сжимающего усилия от домкрата на концах образцов установлены опорные плиты, соединенные с гнутыми оцинкованными профилями при помощи болтового соединения. Размеры и толщины элементов, составляющих опорные плиты, а также количество и диаметр болтов определены из условия передачи вертикального усилия на стойку с превышением в 1,5 раза от расчетной несущей способности стойки.

Установка и закрепление стойки на испытательном стенде выполняется через шаровой шарнир, который обеспечивает поворот стойки в опорном сечении и исключает защемление стойки под нагрузкой. Нагрузка от домкрата на стойку передается также через шаровой шарнир. Шарниры являются частями испытательного стенда.

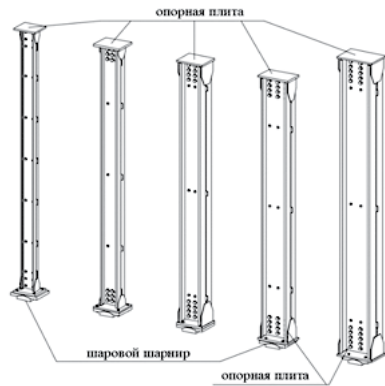


Рис.2. Принципиальный вид образцов для испытания

В качестве максимальных нагрузок при испытании составных стоек из холодногнутых профилей С-образного сечения были приняты значения нагрузок, полученные при расчете стоек на общую устойчивость [3, 4, 5].

Для моделирования работы элементов составного сечения разработаны серии опытных образцов, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

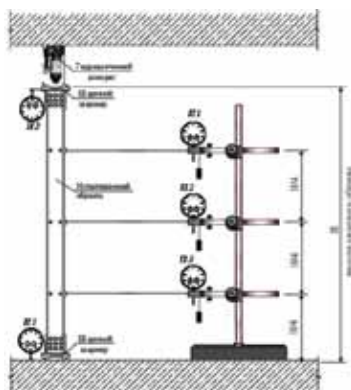
Серии опытных образцов

| Компонент          | Сечение, мм<br>(высота стенки × ширина полки ×<br>размер отгиба × толщина)                                      | Высота об-<br>разца Н, м | Число опы-<br>тных образцов,<br>шт. | Марка прока-<br>та по ГОСТ<br>P52246-2016 | Испытательная<br>нагрузка,<br>полученная по<br>расчету Р, кгс |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Опытный образец №1 |  2 × AC150 × 45 × 12×1,6     | 3                        | 2                                   | 350                                       | 7600                                                          |
| Опытный образец №2 |  2 × AC200 × 75 × 19,5 × 2,0 | 3                        | 2                                   | 350                                       | 20300                                                         |
| Опытный образец №3 |  2 × AC250 × 110 × 24 × 2,5  | 3                        | 2                                   | 350                                       | 37500                                                         |
| Опытный образец №4 |  2 × AC300 × 90 × 20 × 3,0   | 3                        | 2                                   | 350                                       | 43000                                                         |
| Опытный образец №5 |  2 × AC360 × 125 × 30 × 3,5  | 3,6                      | 2                                   | 350                                       | 72000                                                         |

Для измерения горизонтальных перемещений контролируемых точек в плоскости и из плоскости составных стоек использовались прогибомеры Аистова — Овчинникова БПАО (в плоскости стойки — 3 шт. и из плоскости стойки — 3 шт.). Для измерения вертикальных перемещений стоек под нагрузкой использовались индикаторы часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм (И1 – И2) – 2 шт.

Схема расстановки измерительных приборов представлена на рис. 3.

На основе рекомендаций в [2] дополнительно в процессе нагружения образца в контрольных точках фиксировались перемещения стенки С-образного холодногнутого профиля из плоскости (депланация) (рис. 4), а также раскрытие зазора между профилями составного элемента (расхождение ветвей на участках между соединяющими болтовыми соединениями) (рис. 5).



**Рис.3.** Схема расстановки измерительных приборов



**Рис.4.** Испытываемые образцы с контрольными точками для замера перемещений. Разметка, нанесенная на поверхность образцов



**Рис.5.** Контролируемый зазор между стенками С-образных профилей составной стойки

Испытания составных стоек из холодногнутых профилей проведены в следующей последовательности:

1. Проведение пробного нагружения (обжатие):

1.1. Последовательное равноступенчатое нагружение опытного образца. На каждой ступени — выдержка под нагрузкой не менее 5 мин. Загружение велось с шагом нагрузки

25% от пробной нагрузки, составляющей 30% от расчетной (испытательной);

1.2. Равноступенчатая разгрузка опытного образца с выдержкой на каждой ступени не менее 5 мин. Шаг нагрузки – 50% от пробной нагрузки.

## 2. Проведение испытаний на прочность:

2.1. Последовательное равноступенчатое нагружение опытного образца с фиксацией показаний приборов в контролируемых точках и приведенных критериев отказа на каждом этапе. На каждой ступени выдержка под нагрузкой до стабилизации показаний приборов, но не менее 5 мин. Загружение проводилось с шагом нагрузки 10% от расчетной (испытательной). При наступлении состояния конструкции, при котором прогибы становились значительно нелинейными, ступени нагрузки уменьшались в два раза;

2.2. Выдержка опытного образца под нагрузкой (испытательной) в течение не менее 30 мин с фиксацией показаний приборов с интервалом 10 мин до и после выдержки;

2.3. Равноступенчатая разгрузка опытного образца с фиксацией показаний приборов в контролируемых точках на каждом этапе разгрузки. Шаг узловой нагрузки – 25% от расчетной (испытательной);

2.4. Визуальный и инструментальный контроль технического состояния испытываемого образца. Целью визуального и инструментального контроля было выявление значительных локальных искажений формы сечений или дефектов, свидетельствующих о непригодности конструкции после испытаний.

## 3. Проведение испытаний до разрушения опытного образца:

3.1 Загружение опытного образца на 70% от расчетной (испытательной) нагрузки с дальнейшим последовательным равноступенчатым нагружением опытного образца с шагом нагрузки 10% от расчетной (испытательной) нагрузки, с фиксацией показаний приборов в контролируемых точках и приведенных критериев отказа на каждом этапе. На каждой ступени выдержка под нагрузкой до стабилизации показаний приборов, но не менее 5 мин. По наступлении состояния конструкции, при котором прогибы становились значительно нелинейными, ступени нагрузки уменьшались в два раза.

Схематически приложение нагрузки к стойке представлено на рис. 6.

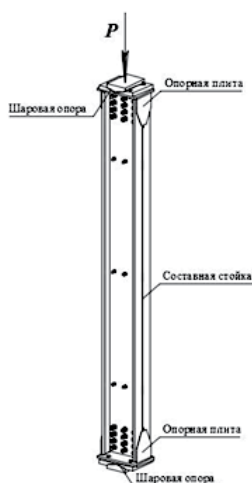


Рис.6. Схема приложение нагрузки к стойке

Расчет и проектирование стальных тонкостенных образцов из холодногнутых С-образных оцинкованных профилей выполнены согласно требованиям СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования» [4].

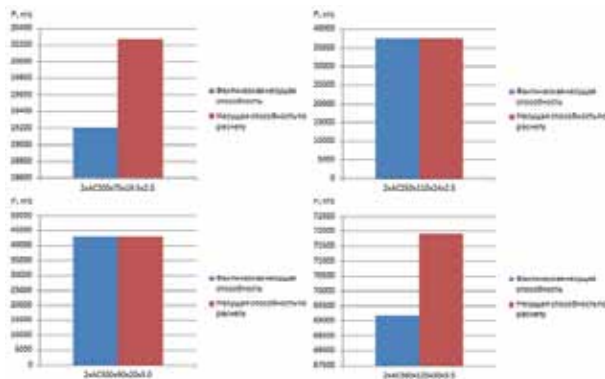
Согласно этому нормативному документу расчет составных сечений из уголков, швеллеров, С- и  $\Sigma$ -профилей, соединенных вплотную или через прокладки, следует выполнять как сплошностенчатых при условии, что участки между соединяющими их болтами не превышают для сжатых элементов  $30 i_{ef \min}$ . Указанное требование регламентирует частоту креплений профилей между собой независимо от уровня напряжений в элементе и определяется исключительно геометрией сечения профиля, входящего в составной элемент. Кроме этого, при геометрических размерах профиля с малой или отсутствующей редуцируемой частью увеличение толщины профиля приводит к необходимости более частого крепления ветвей между собой ввиду уменьшения радиуса инерции.

По результатам проведенных испытаний было установлено, что выполнение только указанного требования не позволяет считать составное сечение как сплошностенчатое. Несущая способность элементов, полученная в ходе расчетов, является в некоторых случаях завышенной по отношению к реальной несущей способности (рис. 7).

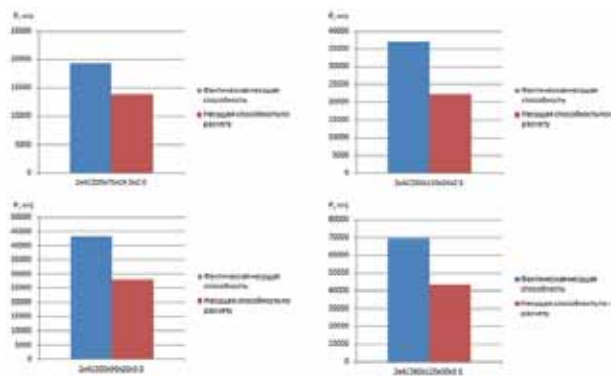
Расчет составного сечения согласно п. 7.7.8.7 СП 260.1325800.2016, который предполагает выполнение проверки ветвей на изгибно-крутильную форму потери устойчивости с учетом дополнительных моментов  $\Delta M = Ne_{N(x,y)}$  на расчетной длине ветви, равной расстоянию между планками или соединяющими болтами, приводит к занижению общей несущей способности профиля относительно показанной в ходе испытаний (рис. 8).

Данные по несущей способности и формам разрушения образцов по результатам натурных испытаний соответствуют результатам численного расчета, полученного в программном комплексе ANSYS (рис. 9-11).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для составных стоек с гибкостью от  $\lambda_{\min} = 120$  и более формой разрушения является потеря общей устойчивости, для стоек с гибкостью  $\lambda_{\min} = 100$  и менее – потеря местной устойчивости.



**Рис.7.** Сравнение фактической несущей способности, полученной по результатам испытания, с расчетной несущей способностью составной стойки, вычисленной как для сплошностенчатого элемента



**Рис.8.** Сравнение фактической несущей способности по результатам испытания с расчетной несущей способностью составного сечения согласно п. 7.7.8.7 СП 260.1325800.2016



**Рис.9.** Форма разрушения составной стойки из профилей 2xAC150x45x12x1,6 (потеря общей устойчивости)



**Рис.10.** Форма разрушения составной стойки из профилей 2xAC250x110x24x2,5 (потеря местной устойчивости профиля в средней части стойки)



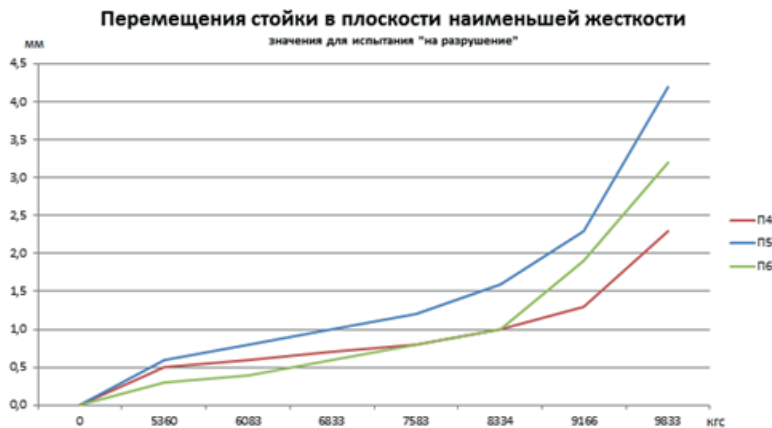


**Рис.11.** Форма разрушения составной стойки из профилей  $2 \times \text{AC}300 \times 90 \times 20 \times 3,0$  (потеря местной устойчивости профиля в опорной зоне)

Испытанные составные стойки из С-образных холодногнутых профилей показали себя как предсказуемые конструкции, с прогнозируемым исчерпанием несущей способности, имеющие линейную зависимость приращения деформаций в диапазоне значений расчетных нагрузок (в упругой стадии). После снятия расчетной нагрузки конструкции возвращались в свое исходное состояние.

Графики зависимостей «нагрузка – деформация», представленные далее, наглядно показывают линейный характер как общих деформаций (общие перемещения стойки и взаимное перемещение ветвей на участках между болтовыми соединениями), так и локальных деформаций (депланация стенки профиля).

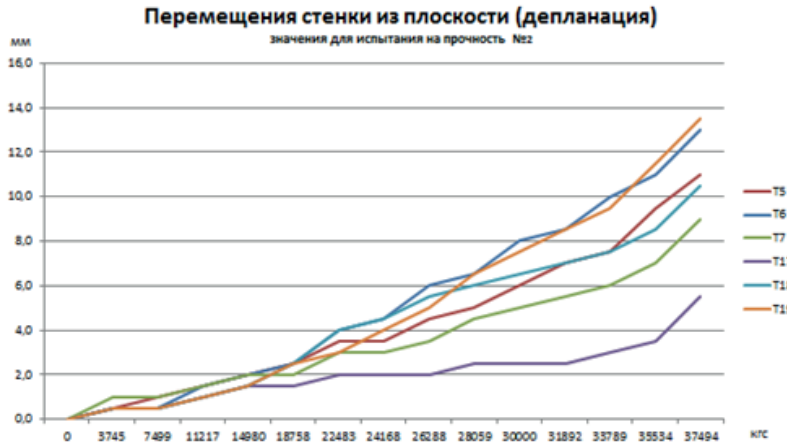
На рис. 12 представлена зависимость общих перемещений под нагрузкой составной стойки из профилей  $2 \times \text{AC}150 \times 45 \times 12 \times 1,6$ . Кривые П4, П5 и П6 отображают перемещения стойки в нижней, центральной и верхней четвертях высоты соответственно. Замеры деформации выполнены в плоскости наименьшей жесткости стойки. Потеря общей устойчивости характерна для составных стоек с гибкостью от  $\lambda_{\min} = 120$  и более.



**Рис.12.** Общие перемещения в плоскости наименьшей жесткости. Зависимость «нагрузка – деформация» для составной стойки из профилей  $2 \times \text{AC}150 \times 45 \times 12 \times 1,6$  (П4, П5, П6 – контролируемые точки в каждой четверти по высоте стойки)



На рис. 13 представлена зависимость локальных перемещений под нагрузкой стенки С-образного профиля, входящего в составное сечение стойки. Зависимость приведена для стойки из профилей 2×АС250×110×24×2,5. Замеры деформаций стенки (Т5 – Т19) проведены в разных точках по высоте стойки. Деформация сечения и, как следствие, потеря местной устойчивости являются характерной формой исчерпания несущей способности для стоек с гибкостью  $\lambda_{\min} = 100$  и менее.



**Рис.13.** Перемещение стенки С-профиля из плоскости (депланация).  
Зависимость «нагрузка – деформация» для составной стойки из профилей 2×АС250×110×24×2,5  
(Т5 – Т19 – контролируемые точки на стенке профиля по высоте стойки)

На рис. 14 представлена зависимость перемещения под нагрузкой ветвей составной стойки на участках между болтовыми соединениями, установленными с шагом  $30 i_{ef \min}$ . Перемещения приведены для стойки из профилей 2×АС360×125×30×3,5 для участков в верхней и нижней ее части.



**Рис.14.** Перемещение профилей стойки на участках между болтовыми соединениями.  
Зависимость «нагрузка– деформация» для составной стойки из профилей 2×АС360×125×30×3,5

## Выводы

Анализ результатов испытаний показывает, что в некоторых случаях для составных стоек из С-образных профилей несущая способность, определенная в ходе испытания, имеет меньшее значение, чем полученная по расчету как для сплошностенчатых сечения при условии, что участки между соединяющими их болтами не превышают для сжатых элементов  $30 i_{ef\min}$ . Надо отметить, что определенная сходимость результатов прослеживается, и завышение расчетных значений против результатов испытаний составляет до 5%.

Разница же между несущей способностью, определенной согласно п. 7.7.8.7 СП 260.1325800.2016, и фактически показанной несущей способностью составляет от 38,8 до 67,7%.

Ввиду ограниченного числа испытанных образцов вопрос определения реальной несущей способности элементов составного сечения требует дальнейшего изучения как по номенклатуре профилей, типам сечений, так и по длинам образцов.

В рамках поставленной задачи в качестве рекомендаций для проектирования составных стоек из С-образных профилей, соединённых между собой непосредственно или через прокладки на расстоянии, не превышающем  $30 i_{ef\min}$ , может служить использование в расчете пониженного коэффициента условий работы 0,9 вместо 0,95, указанного в таблице 5.1 СП 260.1325800.2016. Одновременно с этим можно рекомендовать исключение необходимости проверки ветвей элемента на участках между болтовыми соединениями по п. 7.7.8.7, так как значение несущей способности, полученное при этой проверке, занижено. При выполнении этих рекомендаций за счет понижения коэффициента условий работы расчетная несущая способность составных стоек будет соответствовать фактической.

## Библиографический список

1. Лампси Б.Б. Прочность тонкостенных металлических конструкций. — М.: Стройиздат, 1987. — С. 135-169.
2. Конаков А.И. Контроль за состоянием конструкций замерами деформаций / Исследования надежности металлических конструкций. ЦНИИСК, труды института. — М.: ЦНИИСК, 1979. — С.117-122.
3. Гарднер Л., Нетеркот Д.А. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 3: Проектирование стальных конструкций EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-8. Перев. с англ. — М.: МГСУ-МИСИ, 2013. — С.54-160.
4. СП 260.1325800.2016 Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования.
5. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*.

## Автор

Глеб Владимирович НЕФЕДОВ, аспирант ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Gleb NEFEDOV, postgraduate student of TSNIISK named after V.A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: [gleb.nefedov@andrometa.ru](mailto:gleb.nefedov@andrometa.ru)

тел.: +7 (484) 395-24-24