

УДК 624.072.002.2

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.168.2017.101874>

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРУБЧАТЫХ  
СТЕРЖНЕЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ОСТАТОЧНОГО  
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

**О. Н. Козлова** (научный сотрудник ТОВ «Научно-производственное объединение  
«УКРБУДЭКСПЕРТ» г. Киев)

**МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРУБЧАСТИХ  
СТРИЖНІВ НА СТІЙКІСТЬ З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗАЛИШКОВОГО  
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ**

**О. М. Козлова** (науковий співробітник ТОВ «Науково-виробниче об'єднання  
«УКРБУДЕКСПЕРТ» м. Київ)

**METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF TUBULAR RODS ON  
STABILITY WITH REGULATION OF RESIDUAL TENSIVE STATE**

**O. Kozlova** (researcher "Scientific and Production Association "UKRBUDEXPERT", Kiev)

*Работоспособность любой конструкции определяется не только требованиями прочности, но и требованиями устойчивости отдельных ее элементов. При потере устойчивости отдельного сварного элемента нарушается нормальная работа всей конструкции, в состав которой входит деформировавшийся стержень, что равноценно разрушению всей конструкции.*

*В связи с тем, что в сварных конструкциях имеет место напряженно-деформированное состояние, созданное в процессе сварки, важно выяснить степень его влияния на местную и общую устойчивость элементов сварных конструкций.*

*Цель настоящих исследований – проведение экспериментальных испытаний на устойчивость сжатых стержней трубчатого сечения с регулированием остаточного напряженного состояния путем наплавки холостых валиков по образующим.*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, бесшовные трубы, устойчивость.

*Працездатність будь-якої конструкції визначається не лише вимогами міцності, але і вимогами стійкості окремих її елементів. При втраті стійкості окремого зварного елемента порушується нормальна робота всієї конструкції, до складу якої входить стрижень, що деформувався. Це рівноцінно її руйнуванню.*

У зв'язку з тим, що в зварних конструкціях має місце напружено-деформований стан, створений в процесі зварювання, важливо з'ясувати його вплив на місцеву і загальну стійкість елементів зварних конструкцій.

Мета даних досліджень – проведення експериментальних випробувань на стійкість стиснених стрижнів трубчастого перетину з регулюванням залишкового напруженого стану шляхом наплавлення холостих валиків по твірних.

**Ключові слова:** залишкові напруження, безшовні труби, стійкість.

*The capacity of any construction is determined not only the requirements of durability but also requirements of stability of its separate elements. At the loss of stability of the separate welded element, normal work of all of construction which the deformed bar enters in the complement of is violated, that equivalently to its destruction.*

*In connection with that the tensely-deformed state, created in the process of welding, takes a place in the welded constructions, it is important to find out the degree of its influence on local and common stability of elements of the welded constructions.*

*A purpose of the real researches is conducting of experimental tests on stability of the compressed bars of tubular section with adjusting of the remaining tense state by single rollers on formative.*

**Keywords:** remaining tensions, nonsuture pipes, stability.

**Введение.** Влияние напряжений, вызванных сваркой, (остаточные напряжения) на общую устойчивость элементов сварных конструкций изучалось как отечественными, так и зарубежными учеными. В полной мере этот вопрос представляет интерес и для элементов из бесшовных труб, поскольку они входят в состав большепролетных покрытий гражданских и промышленных зданий, башенных сооружений, мачт и т.п.

Институт электросварки НАН Украины в 30-е годы прошлого столетия проводил исследования элементов из труб с наплавленными валиками и без них на внецентренное сжатие [1]. Результат проведенных исследований – за счет регулирования остаточного напряженного состояния (ОНС) было достигнуто повышение устойчивости почти на 17 %.

Влияние ОНС на поведение сжатых элементов из труб отмечено в работе Я. Августына [2]. В качестве экспериментальных образцов применялись бесшовные трубы диаметром 40, 44 и 60 мм при толщине стенки 3–4 мм. На образцах производилась односторонняя и двусторонняя наплавка, а также

исследовались образцы без наплавки. Перед наплавкой образцы отпускались при температуре 640°C. Принимались во внимание только остаточные напряжения, направленные параллельно продольной оси элементов. Толщина стенки гарантировала отсутствие местного выпучивания. По результатам работы сделаны выводы о снижении критической нагрузки для шарнирно-опертых элементов небольших гибкостей.

Но и до сегодняшнего времени этот вопрос нельзя назвать решенным.

Исследования, проведенные в области влияния остаточных сварочных напряжений на общую устойчивость сварных стержней, позволяют установить некоторые достоверные предположения [3]:

- зона остаточных напряжений растяжения в сварных стержнях оказывает положительное влияние. Однако степень положительного влияния может быть разной, в зависимости от места расположения растянутой зоны по сечению элемента;

- при расположении растянутой зоны на периферии сечения она может повысить несущую способность элемента;

- при належному використанні напружень, створюваних сваркою, можна підвищувати несущую здатність стиснутих елементів, подібно тому, як зварочні напруження можуть бути використані для підвищення вимогливості зварних конструкцій.

Возрастающие требования к несущей способности и деформативности конструкций при одновременном уменьшении металлоемкости вызывают необходимость анализа их ОНС с учетом технологии изготовления и условий эксплуатации.

Удачное и оптимальное применение трубчатых конструкций, по мнению автора, возможно при всестороннем изучении действительной работы этих конструкций и их элементов. Поэтому исследование устойчивости стержней из труб имеет весьма важное значение.

**Анализ последних достижений и публикаций.** При проектировании несущих элементов строительных конструкций из трубчатых профилей следует использовать соответствующую нормативную базу [4, 5 и др.]. В настоящее время в нормативной литературе отсутствуют данные по расчету и учету ОНС.

**Определение цели и задач исследований.** Цель настоящих исследований – изучение влияния ОНС на устойчивость элементов из стальных труб путем регулирования остаточного напряженного состояния.

**Основная часть исследований.** Статические преимущества трубчатых стержней при центральном сжатии обеспечили широкое распространение труб в качестве конструкционного материала. Начиная с XVIII столетия трубы применяются в различных отраслях техники. Так, для конструкций гражданских зданий и в мостостроении использовались чугунные трубы. В результате значительного прогресса трубного производства, в частности, в связи с созданием в конце XIX столетия высокопроизводительных раскаточных

агрегатов, резко увеличился выпуск бесшовных труб. Эти трубы начали широко применяться для элементов различных механизмов и конструкций.

Существовавшие в тот период способы соединения элементов, в том числе – болтовые и заклепочные, а также хомуты не позволяли создавать простые и надежные узлы и стыки. Трубчатые конструкции (ТК) были очень сложны. Высокая цена и, главное, трудовые затраты при изготовлении определяли непомерную дороговизну ТК. Благодаря этому до 30-х годов прошлого столетия строительные ТК почти не встречались.

Развитие электросварки привело к созданию новых форм стальных конструкций и сооружений. Использование труб сделало значительно более рациональным, ибо узловое сопряжение и стыки элементов намного упростились. Трубчатые конструкции начинают приобретать популярность в строительной практике. Первые известные нам сообщения о применении труб в строительных конструкциях появились в отечественной печати в 1925 г. [6]. Проблемами использования трубчатых профилей занимались также и зарубежные ученые [7].

Однако отмеченные выше возможности более полного использования основного металла при сварке требуют одновременно более полного учета влияния самого процесса на свойства основного металла и на его работоспособность в основных конструкциях и изделиях. Среди такого рода проблем, имеющих исключительно большое значение при определении возможности использования сварки в трубчатых конструкциях, центральное место занимает проблема сварочных остаточных напряжений (ОН) и деформаций [8].

Как известно, ОН в сечениях элементов оказывают неоднозначное влияние на несущую способность и устойчивость конструкции, т.е. они могут

как снижать, так и увеличивать величины критических сил. В связи с этим для обеспечения надежной эксплуатации ОН должны быть распределены в сечениях конструкций таким образом, чтобы их влияние было положительным.

Создание зон остаточных растягивающих напряжений (ОРН) возможно путем наплавки сварных швов (холостых валиков) на поверхности трубы по образующим. Получаемое при таких воздействиях распределение ОН в сечениях конструкций, приводящее к увеличению несущей способности, в дальнейшем будет называться оптимальным.

На основании вышеизложенного, учитывая актуальность проблемы, ведется работа по исследованию распределения ОН и их влияния на устойчивость и несущую способность сжатых стержней трубчатого сечения.

Характер распределения деформаций и напряжений, возникающих в элементах после изготовления с применением сварки, лучше всего изучать экспериментально. По результатам правильно поставленного эксперимента можно судить о степени влияния того или иного явления на процесс развития сварочных деформаций и напряжений. В некоторых случаях исследования деформаций и напряжений при сварке сложных конструкций экспериментальный метод является единственно возможным в виду сложности расчета.

Предлагаемый способ повышения несущей способности стержней ТК предусматривает наложение сварных швов по образующим в условиях завода металлоконструкций или строительной площадки. В заводских условиях швы могут накладываться автоматической или полуавтоматической сваркой, в условиях площадки – ручной сваркой.

Методика экспериментальных исследований ОНС, возникающего в элементах из труб после предварительного термического воздействия путем наплавки

сварных швов, и их результаты рассмотрены ранее [9].

В соответствии с поставленными задачами в этой части работы предусматривалось:

- изготовление экспериментальных образцов (далее образцов) – элементов трубчатого сечения с остаточным состоянием, возникающим после предварительного напряжения путем наплавки холостых валиков по образующим, и контрольных образцов, изготовленных из труб в состоянии поставки;

- проведение сравнительных испытаний изготовленных образцов при одинаковых значениях эксцентриситета приложения вертикальной нагрузки в пределах серии образцов;

- проведение сравнительных испытаний изготовленных образцов при центральном приложении вертикальной нагрузки в пределах серии образцов;

- сопоставление результатов испытаний образцов с остаточным состоянием и контрольных образцов (в состоянии поставки);

- исследование возможности повышения устойчивости сжатых элементов за счет наплавки сварных швов, в т.ч. и на части длины;

- использование полученного экспериментального материала для подготовки рекомендаций по расчету сжатых элементов из труб.

Для проведения экспериментальных исследований использовались четыре партии образцов (см. таблицу). В ходе проведения исследований в первую очередь оценивалось влияние остаточных растягивающих напряжений, возникающих после наплавки холостых валиков по образующим, в сравнении с результатами испытаний элементов, изготовленных из труб в состоянии поставки.

Таблица

## Объем основного эксперимента

Серия образцов	Сечение	Количество	Площадь, см <sup>2</sup>	Длина, мм	Гибкость, λ
1	2	3	4	5	6
ТК-1	Стержни из трубчатых элементов Ø 76x4,5 (испытание с эксцентриситетом 1 см)	3	10,1	2600 (2650*)	100
ТК-2	Стержни из трубчатых элементов Ø 76x4,5 с наплавкой одного холостого валика по образующей (испытание с эксцентриситетом 1 см)	3	10,1	2600 (2650*)	100
ТК-3	Стержни из трубчатых элементов Ø 76x4,5 (испытание на центральное сжатие)	2	10,1	2600 (2650*)	100
ТК-4	Стержни из трубчатых элементов Ø 76x4,5 с наплавленными тремя холостыми валиками по образующим под углом 120° (испытание на центральное сжатие)	2	10,1	2600 (2650*)	100

Примечание. Помеченные \* – расстояние между осями катка и шара.

Гибкость образцов определялась с учетом наличия опорных приспособлений.

Все образцы в пределах серии испытывались с применением одинаковых опорных приспособлений, состоящих из верхней и нижней опоры. Верхняя и нижняя опоры состоят из двух частей: съемных, устанавливаемых на торцы образцов, и несъемных, устанавливаемых на опорные части тележки и подвижной траверсы пресса. Между съемной и несъемной частями в специально выполненном пазу устанавливается каток (в нижней опоре) и металлический шар (в верхней опоре) для обеспечения шарнирности опор. Такая схема закрепления элементов позволила провести испытания образцов в плоскости минимальной гибкости с минимальным эксцентриситетом.

Опорные приспособления для испытаний стержней были изготовлены с возможностью моделирования работы элемента фермы из трубчатых элементов (эксцентриситет приложения нагрузки принят 1 см). Наложение сварных швов выполнялось только на отдельных участках с предварительным расчетом необходимого количества тепловложений, таким образом, чтобы сварочные деформации отсутствовали или были незначительными. Но при этом в этих участках труб осуществлялось перераспределение остаточного состояния, положительно влияющего на устойчивость и несущую способность трубчатого элемента.

Схема наплавки холостых валиков представлена на рис. 1.

## ТК-2

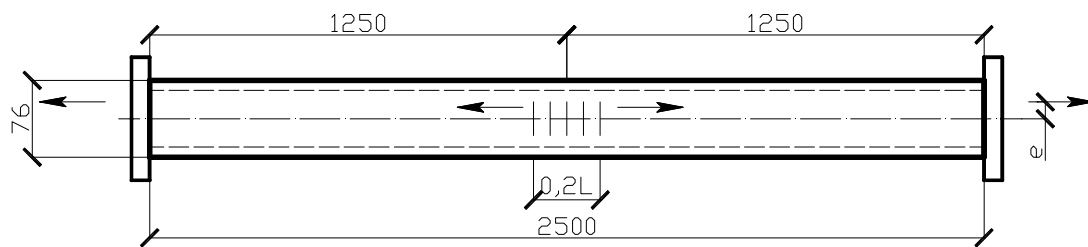


Рис. 1. Конструкция образцов трубчатых элементов серии ТК-2:  
 $e$  – эксцентриситет приложения нагрузки

Испытания образцов проводились в такой последовательности:

1. На образцы первой партии ТК-1 устанавливались и закреплялись опорные части, разработанные индивидуально для каждой серии образцов.

2. Образец с опорными приспособлениями устанавливался под пресс. Благодаря специальной конструкции опорных частей испытания каждого образца выполнялись при одинаковых эксцентриситетах приложения нагрузки.

3. На помещенный под пресс образец устанавливался прогибомер ПАО - 6 и производилось нагружение пробной нагрузкой (примерно  $0,1 R_u$ , где  $R_u$  – предполагаемая разрушающая нагрузка) с целью проверки работоспособности прогибомера и центрирования образца. Центрирование образцов производилось с целью установки по физической оси для обеспечения деформирования без значительных эксцентриситетов. При нагружении снимались показания прогибомера и делался вывод о достаточности центрирования. Если показания прогибомера были нестабильными, нагрузка снималась и образец подвергался центровке. При стабильных показаниях производилось нагружение этапной нагрузкой до потери устойчивости.

4. После достижения критической нагрузки нагружение образца снималось и замерялся остаточный прогиб, полученный в результате пластических деформаций

труб. Затем определялось требуемое количество тепловложений, необходимое для выравнивания полученного прогиба с помощью сварочных деформаций. Производилось регулирование остаточного напряженного состояния путем наплавки холостых валиков по образующим с противоположной выгибу стороны.

5. После регулирования напряженного состояния производилось повторное нагружение образца до потери устойчивости с определением критической силы.

6. Нагружение образцов производилось в следующей последовательности: нагрузка прикладывалась этапами примерно по  $0,1 R_u$ . После достижения этапной нагрузки производилась выдержка не менее 3 минут. Показания прогибомера записывались после приложения этапной нагрузки и выдержки на этапе.

7. Испытания заканчивались после достижения максимума на кривой состояния (прогибы растут без увеличения нагрузки) или после потери местной устойчивости.

8. После завершения испытаний прибор снимался, образец удалялся из-под прессы. Съемные опорные приспособления снимались и новый образец готовился к испытаниям в последовательности, описанной выше.

9. На образцы серии ТК-2 предварительно наносился холостой валик по образующим с предварительным расчетом

по минимальным тепловложениям и производилось испытание по описанной выше методике до достижения критической силы при потере устойчивости. Затем замерялся полученный остаточный прогиб и повторялся алгоритм выполнения работы, описанный для партии ТК-1.

10. Образцы серии ТК-3 испытывались на центральное сжатие по описанной выше методике. При достижении критической нагрузки нагружение образца снималось и замерялся остаточный прогиб, полученный в результате пластических деформаций труб. После завершения испытаний прибор снимался, образец удалялся из-под пресса. Съемные опорные приспособления снимались и новый образец готовился к

испытаниям в последовательности, описанной выше.

11. На образцы серии ТК-4 перед проведением испытаний наносилось три холостых валика под углом  $120^\circ$  с предварительным расчетом необходимых минимальных тепловложений и производились испытания по разработанной методике. При достижении критической нагрузки нагружение образца снималось и замерялся остаточный прогиб, полученный в результате пластических деформаций труб. После завершения испытаний прибор снимался, образец удалялся из-под пресса. Съемные опорные приспособления снимались и новый образец готовился к испытаниям в последовательности, описанной выше (рис. 2, 3).



Рис. 2. Образец серии ТК-1 перед испытанием



Рис. 3. Образец серии ТК-2 после испытания

**Выводы, перспективы, дальнейшее развитие данного направления исследований.** Предложена методика повышения

устойчивости элементов трубчатого сечения путем регулирования остаточного напряженно-деформированного состояния

при предварительной наплавке холостых валиков по образующим.

1. На основании ранее выполненных исследований подтверждена возможность увеличения несущей способности сжатых элементов из труб до 17 % только за счет регулирования ОНС.

2. Наплавка холостого валика на элементы трубчатого сечения позволяет

создать в сечениях оптимальное, с позиций повышения несущей способности, ОНС.

3. Использование предложенной схемы и методики определения параметров остаточного напряженно-деформированного состояния при последующих расчетах несущей способности и деформативности позволит с большей точностью прогнозировать поведение конструкций из трубчатых элементов под нагрузкой.

### *Список использованных источников*

1. Патон, Е. О. Влияние усадочных напряжений на прочность сварных конструкций [Текст] / Е. О. Патон, Б. Н. Горбунов, Д. И. Берштейн // Автогенное дело. – 1937. – № 7. – С. 4-15.
2. Августын, Я. Влияние остаточных напряжений на поведение сжатых стержней [Текст] / Я. Августын // Сварочное производство. – 1961. – № 11. – С. 15–18.
3. Окерблом, Н. О. Влияние остаточных напряжений, создаваемых сваркой, на местную и общую устойчивость элементов сварных конструкций [Текст] / XIII Конгресс Междунар. ин-та сварки (13–19 июня 1960 года в г. Льеже). – М.: Гос. изд-во машиностр. лит., 1962. – С. 233-239.
4. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [Текст] / Мінрегіон України. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
5. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст] / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.
6. Левенсон, Я. С. Конструкции из стальных труб [Текст] / Я. С. Левенсон. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 4-15.
7. Makiro, A. Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole drilling. Pt.1. Theory [Text] / Makiro A., Neison D. // Experimental Mechanics. – 1994. – V. 34, №1. – P. 66–78.
8. Окерблом, Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях. [Текст] / Н. О. Окерблом. – М.-Л.: 1-я тип. Машгиза в Л., 1950. – С. 4-9.
9. Голоднов, А. И. Исследование остаточных напряжений в элементах трубчатого сечения после наплавки сварных швов [Текст] / А. И. Голоднов, О. Н. Козлова, А.П. Иванов // 36. наук. праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського / Відп. ред. О. В. Шимановський. – К.: Вид-во «Сталь», 2008. – Вип. 1. – С. 75-79.

---

Козлова Ольга Миколаївна, науковий співробітник ТОВ «Науково-виробниче об'єднання «УКРБУДЕКСПЕРТ», Київ. Тел. (050)246-91-89. E-mail: Olechka-Kiev@mail.ru.

Kozlova Olga, researcher of "Scientific and Production Association "UKRBUDEXPERT", Kiev. Tel. (050)246-91-89. E-mail: Olechka-Kiev@mail.ru.

Стаття прийнята 27.03.2017 р.