

УДК 624.072.002.2

Влияние остаточного напряженно-деформированного состояния на устойчивость сжатых элементов из трубчатых профилей

Козлова О.Н.

ОАО «УкрНИИПроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского», Украина

Анотація. Починаючи з XIX ст., труби застосовуються у різних галузях народного господарства. У початковий період розвитку трубчасті конструкції (ТК) найчастіше зустрічалися там, де зниження ваги було одним з основних принципів проектування (дирижаблестроєння, велосипедна і автомобільна промисловість, літакобудування). Розвиток електросварювання сприяв створенню нових форм сталевих будівельних конструкцій. Використання труб стало значно раціональнішим, оскільки вузлові сполучення і стики істотно спростилися. Протезварні конструкції мають особливостей. Так, крім напружень і деформацій, що виникають у деталях під впливом прикладених навантажень, в них виникають залишкові напруження (ЗН), які існують в тілі конструкції навіть за відсутності дії будь-яких зовнішніх сил і впливають на стійкість і деформативність конструкцій. Сьогодні в нормативній літературі [1, 2] відсутні дані щодо розрахунку і урахування залишкового напруженого стану (ЗНС) в елементах ТК.

Аннотация. Начиная с XIX ст., трубы применяются в различных отраслях народного хозяйства. В начальный период развития трубчатые конструкции (ТК) чаще всего встречались там, где снижение веса было одним из основных принципов проектирования (дирижаблестроение, велосипедная и автомобильная промышленности, самолетостроение). Развитие электросварки привело к созданию новых форм стальных строительных конструкций. Использование труб стало значительно более рациональным, так как узловые сопряжения и стыки существенно упростились. Однако сварные конструкции имеют ряд особенностей. Так, помимо напряжений и деформаций, возникающих в деталях под действием приложенных нагрузок, в них возникают остаточные напряжения (ОН), которые существуют в теле конструкции даже при отсутствии воздействия каких-либо внешних сил и оказывают влияние на устойчивость и деформативность конструкций. В настоящее время в нормативной литературе [1, 2] отсутствуют данные по расчету и учету остаточного напряженного состояния (ОНС) в элементах ТК.

Abstract. Since the XIX century, pipes are used in different industries of industry. In an initial period of development tubular constructions (TC) more frequent than all met wherein a decline of weight was one of basic principles of planning (airship-building, bicycle and motor-car industry, aircraft construction). Development of the electric welding resulted in creation of new forms of steel build constructions. The use of pipes was done considerably more rational, because key interfaces and joints were substantially simplified. However, much the welded constructions have a row of features. So, besides tensions and deformations, arising up in details under the action of the attached loadings, in them there are remaining tensions which exist in the body of construction even in default of influence of some external forces and have influence on stability of constructions. Presently in normative literature [1, 2] information is absent upon settlement and account of the remaining tense consisting (RTC) of elements of TC.

Ключевые слова: остаточные напряжения, бесшовные трубы, устойчивость.

Введение. Постановка проблемы. Расширение областей применения труб в сварных конструкциях связано с рядом преимуществ, которыми отличается данный тип сечения:

1. Высокие и одинаковые во всех направлениях значения геометрических характеристик сечений, что позволяет эффективно использовать трубы в стержнях, работающих на центральное и внецентренное сжатие, а также кручение.
2. Высокая местная устойчивость стенок труб, обеспечивающая возможность использования тонкостенных сечений.
3. Повышенная коррозионная стойкость, обусловленная относительно малой площадью поверхности, подверженной коррозии, доступностью поверхности для очистки и окраски, отсутствием в ней щелей, пазух и карманов.
4. Эстетичность и архитектурная выразительность конструкций, а также широкая номенклатура сортамента производимых промышленностью труб, способствуют их применению как в малых архитектурных формах, так и в уникальных сооружениях.
5. Своеобразной особенностью ТК является возможность сочетания в них функций несущих конструкций с технологическими функциями.

При проектировании и изготовлении ТК не учитывается остаточное напряженное состояние в элементах после изготовления, поэтому исследование устойчивости стержней из труб имеет весьма важное практическое значение.

Работа является одним из этапов исследований, выполняющихся в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины в соответствии с ГНТП 5.4. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии, оборудование и материалы для сварки и родственных процессов».

Анализ последних достижений и публикаций. Производству сварных конструкций присущи некоторые особенности [3], связанные с процессом теплового воздействия сварки на соединяемые элементы конструкций, проявляющиеся в виде различных остаточных явлений. Эти особенности можно охарактеризовать двумя факторами:

- а) температурным полем, вызванным действием сварочной дуги;
- б) нарушениями технологии производства сварных конструкций.

Каждый из перечисленных факторов вызывает в конструкции немало серьезных отклонений от нормального состояния, снижая иногда ее несущую способность.

Первый фактор – неизбежный результат самого процесса сварки. Однако, температурным полем можно управлять, снижая вредное влияние его пос-

ледствий. Поэтому очень важно уметь правильно рассчитать температурное поле и связанные с ним вторичные процессы. Существующие расчетные методики [1, 2] практически не учитывают влияние остаточных напряжений (ОН) на последующее деформирование конструкций под нагрузкой, хотя оно может быть неоднозначным. Анализ публикаций [4] свидетельствует о недостаточном внимании к решению этого вопроса, что и предопределило проведение настоящих исследований.

Цель работы. Цель настоящих исследований – проведение испытаний сжатых стержней из труб при наличии различных видов остаточного напряженно-деформированного состояния.

Основная часть. Трубчатые конструкции начинают использоваться с XIX столетия и находят применение в различных отраслях народного хозяйства. Особенности ТК в том, что они сочетают в себе легкость, повышенную коррозионную стойкость и изящество форм. Статические преимущества трубчатых стержней при центральной сжатии обеспечили широкое распространение труб в качестве конструкционного материала.

В начальный период развития ТК чаще всего встречались там, где снижение веса было одним из основных принципов проектирования – в дирижаблестроении, велосипедной и автомобильной промышленности, самолетостроении [5]. 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. Конструкции из труб были очень сложны. Обращает внимание также высокая цена и трудоемкость выполнения ТК. Поэтому до 30-х годов прошлого столетия строительные конструкции из труб почти не встречались.

Развитие электросварки привело к созданию новых форм стальных строительных конструкций. Использование труб сделалось значительно более рациональным, так как узловое сопряжения и стыки существенно упростились. ТК начинают приобретать популярность и в строительной практике. Первые известные сообщения о применении труб в строительных конструкциях появились в печати в 1925 г. Впервые в Германии были выполнены сварные трубчатые фермы покрытия пролетом 9,25 м; затем были изготовлены фермы пролетом 15,5 м для покрытия с подвесным оборудованием (кошками) по нижнему поясу. В 1933 г. в Италии на то время смелым сооружением стала цельносварная шестигранная башня высотой 110 м (*Torre Littoria*). Стойки башни выполнены из бесшовных труб диаметром в верхней части сооружения 165 мм, в нижней – 432×14 мм.

В бывшем СССР проектирование и строительство радиопор в виде трубчатых башен и мачт началось в 1940 – 1941 гг. В годы Великой Оте-

чественной войны, помимо радиоопор, из труб было возведено несколько каркасов цехов. Особенно интенсивное развитие ТК началось в послевоенный период и продолжается до сегодняшнего времени. Последняя четверть прошлого века характеризуется повышенным интересом к использованию в сварных конструкциях труб. После распада СССР и последовавшего экономического кризиса, который охватил и Украину, строительство крупных сооружений было практически прекращено.

С началом подъема экономики в Украине начала возрождаться строительная индустрия, а также возрос интерес к сварным конструкциям из труб. Немалую роль в этом сыграло успешное преодоление кризиса ведущими в области проектирования металлических конструкций институтами, одним из которых является ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция имени В.Н. Шимановского» (г. Киев), на комплексной производственной базе которого выполняются заказы по изготовлению и монтажу металлических конструкций. Техническая оснащенность базы позволяет выполнять стержневые конструкции из труб со сложными стыковыми соединениями с помощью машины TUBOSEC «С» с шестиосевой компьютерной цифровой системой управления (рис. 1). Машина TUBOSEC «С» используется для резки труб с подготовкой кромок под сварку, а также раскроя листового проката для последующего изготовления металлоконструкций.



Рис. 1. Машина TUBOSEC «С» в процессе работы

К числу сооружений, выполненных в последние годы ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция имени В.Н. Шимановского» с применением ТК, можно отнести: покрытие Международного выставочного центра в Киеве на Броварском проспекте (2002 г.) (рис. 2); промышленный цех ОАО «Ветропарк Гостомельский стеклозавод» (2004 – 2007 гг.); навес над трибунами стадиона в Днепропетровске (2009 г.) и многие другие объекты.



Рис. 2. Фрагмент фасада Международного выставочного центра в Киеве

Вместе с тем, сварные конструкции из труб выдвигают и определенные требования к технологии сварки. Так, затруднительно создание эффективных конструкций без возможности получения стыковых соединений труб, равнопрочных основному металлу. Это вызывает необходимость применять сварочные материалы, обеспечивающие такие свойства сварных соединений, которые не уступают свойствам основного металла в широком диапазоне классов сталей и технологии соединения, способные обеспечить высокое их качество не только при двусторонней, но и односторонней сварке. Благодаря современным достижениям в сварочном производстве эти задачи успешно решаются для разных классов сталей и диаметров труб.

К особенностям сварных конструкций относится появление в них остаточных напряжений, которые существуют в теле конструкции даже при отсутствии воздействия каких-либо внешних сил и оказывают влияние на устойчивость и деформативность конструкций. Изучению напряженно-деформированного состояния (НДС), создаваемого термическим циклом сварки в стальных конструкциях, посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов [6, 7]. Разработаны различные теоретические и экспериментальные методы определения сварочных напряжений и деформаций. Однако этот вопрос нельзя считать решенным до конца.

Для изучения вопроса влияния НДС на устойчивость сжатых элементов из труб была разработана методика и проведены экспериментальные исследования. Методика проведения исследований изложена в работе [8].

Экспериментальные исследования сжатых стержней из труб при наличии НДС, а также изготовление образцов, проводились на кафедре строитель-

них конструкцій Донбасского государственного технического университета (ДонГТУ), г. Алчевск.

Образцы представляли собой элементы трубчатого сечения с размерами поперечного сечения $\&76\times 4,5$ мм, одинаковой гибкости. Стержни испытывались как в состоянии поставки (образцы серии ТК-1 и ТК-4), так и с регулированием ОНС путем наплавки холостых валиков по образующим (образцы серии ТК-2, ТК-3, ТК-5). Образцы серий ТК-1 – ТК-3 испытывались с эксцентриситетом 10 мм, образцы серий ТК-4, ТК-5 – на центральное сжатие.

Все образцы в пределах серии испытывались с применением одинаковых опорных приспособлений, состоящих из верхней и нижней опор. Верхняя и нижняя опоры состоят из двух частей: съемных, устанавливаемых на торцы образцов, и несъемных, устанавливаемых на опорные части тележки и подвижной траверсы прессы. Между съемной и несъемной частями в специально выполненном пазу устанавливался цилиндр для обеспечения ожидаемого направления основных деформаций (рис. 3, 4).

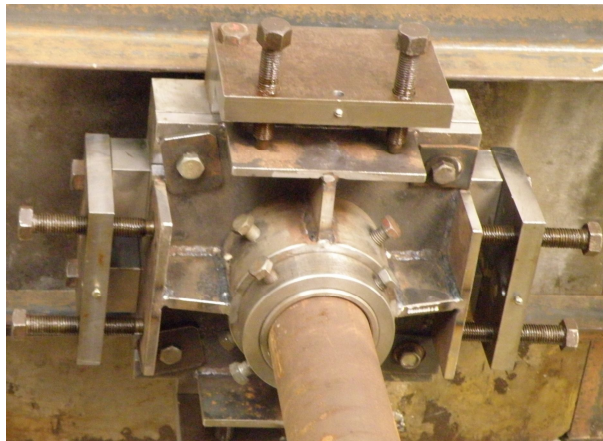


Рис. 3. Общий вид опорного приспособления (верхняя опора)

Опорные приспособления экспериментальных образцов трубчатого сечения позволяли проводить испытания как на центральное сжатие, так и с возможным случайным эксцентриситетом (эксцентриситет приложения нагрузки был принят равным 10 мм). Испытания производились на гидравлическом прессе марки ГРМ-100. Отсчеты брались по шкале В с пределом измерения от 0 до 50 т с ценой деления 0,1 т. Погрешность измерения не превышала 1 % от величины нагрузки (по данным тарифов прессы). Прессы перед испытаниями тарировались. Один из образцов в ходе испытаний показан на рис. 5.

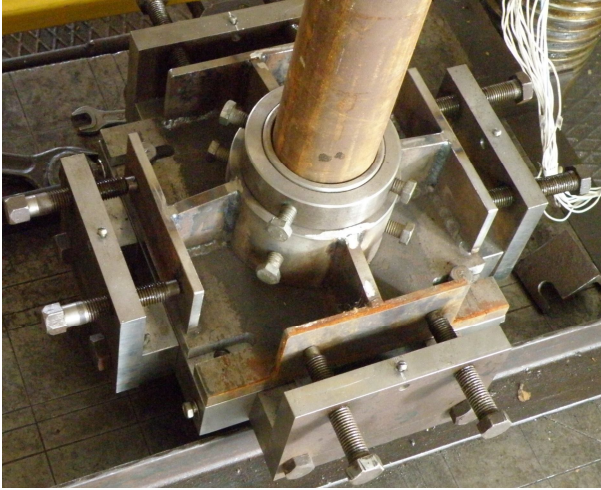


Рис. 4. Общий вид опорного приспособления (нижняя опора)

Определение ОНС проводилось неразрушающим способом. Результаты определения ОНС изложены в работе [9].



Рис. 5. Один из стержней после проведения испытаний

Результаты проведения испытаний показаны на рис. 6, 7.

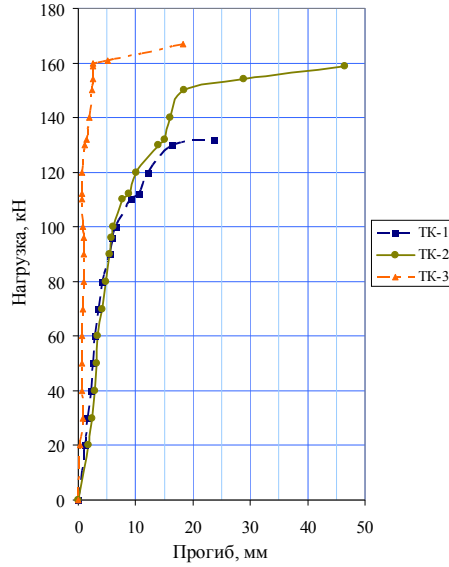


Рис. 6. Результаты испытаний стержней по сериям ТК-1 – ТК-3

Как видно из этих рисунков трубы, в которых проводилось регулирование ОНС с помощью наплавки холостых валиков (ТК-2, ТК-3, ТК-5) выдерживают нагрузку в среднем на 25 % больше, чем трубы в состоянии поставки (ТК-1, ТК-4).

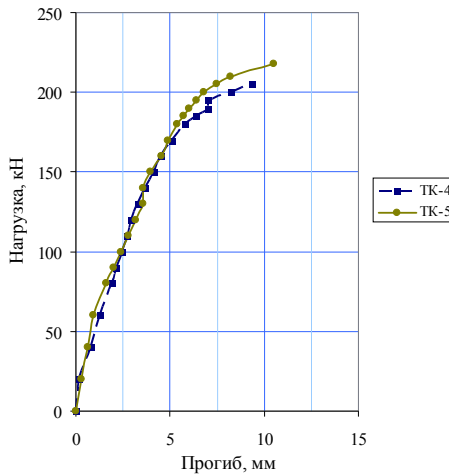


Рис. 7. Результаты испытаний стержней по сериям ТК-4, ТК-5

Выводы

По данным ранее выполненным исследованиям подтверждена возможность увеличения несущей способности сжатых элементов из труб до 25 % только за счет регулирования ОНС.

Наплавка холостого валика на элементы трубчатого сечения позволяет создать в сечениях рациональное с позиций повышения несущей способности ОНС.

Литература

- [1] Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНиП II-23-81* [действующие от 1982-01-01, утвержденные с изменениями, постановлением Госстроя СССР, № 121 от 1989-07-12] / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
- [2] Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування: ДБН В.2.3-14:2006 [надано чинності наказом Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства від "06" травня 2006 р. № 160] / Мінрегіонбуд України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2006. – 367 с.
- [3] Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Недосека А.Я. – Киев: ИНДПРОМ, 2001. – 815 с.
- [4] Голоднов А.И. К вопросу учета остаточных напряжений в сечениях сжатых двутавровых стержней при их расчетах / Голоднов А.И. // Автоматична сварка. – 2001. – № 5. – С. 8–10.
- [5] Левенсон Я.С. Конструкции из стальных труб / Левенсон Я.С. / М.: Стройиздат. 1967. – С. 4–15.
- [6] Патон Е.О. Влияние усадочных напряжений на прочность сварных конструкций / Патон Е.О., Горбунов Б.Н., Берштейн Д.И. // Автоген. дело. – 1937. – № 7. – С. 4–15.
- [7] Августын Я. Влияние остаточных напряжений на поведение сжатых стержней / Августын Я. // Сварочное пр-во. – 1960. – № 11. – С. 15–18.
- [8] Козлова О.Н. Методика экспериментальных исследований сжатых элементов из труб состояния / Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. Вип. 3, 2009р. С. 122 – 128.
- [9] Голоднов А.И. Методика и результаты определения остаточных напряжений в стальных трубах после локальных термических воздействия / Голоднов А.И., Иванов А.П., Козлова О.Н. // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського, 2008. – Вип. 1. – С. 74–79.

Надійшла до редколегії 30.06.2010 р.