

УДК 624.072.002.2

к.т.н. Псюк В. В.,
Никишина И. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

УСИЛЕНИЕ И ПРАВКА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТРУБ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРКИ

В статье рассматривается возможность усиления и правки элементов из труб квадратного сечения различной гибкости, которые имели остаточный прогиб после проведения испытания на устойчивость. Предложена методика расчёта параметров правки стальных элементов путём наплавки холостых валиков на растянутой стороне образцов. Изменение остаточного напряжённого состояния конструкций после наплавки сварных швов прогнозируется расчётным путём и подтверждено результатами экспериментальных исследований.

Приведены результаты экспериментального определения устойчивости сжатых элементов из труб квадратного сечения в состоянии поставки и после правки предварительно испытанных образцов.

Ключевые слова: усиление, правка, стальные конструкции, остаточные напряжения, устойчивость, квадратное сечение, сварка.

Постановка проблемы. Работа усиливаемых конструкций чрезвычайно сложна и зависит от множества факторов как конструктивного, так и технологического характера. При разработке методов расчёта усиливаемых конструкций это обуславливает необходимость отказа от учёта ряда второстепенных факторов и внесения упрощающих предпосылок [1].

Выбор схемы усиления стержневых конструкций является многовариантной задачей. Учитывая современный уровень развития методов расчёта и проектирования конструкций, а также многообразие возможных схем и приёмов усиления, разработка общего подхода к задачам оптимизации представляется делом будущего. Решение задач оптимизации осложняется ещё и тем, что основным критерием оптимальности усиления зачастую является не экономия материала или снижение стоимости комплекса работ по усилению, а обеспечение наибольшей его технологичности. При этом под технологичностью понимается не удобство проведения работ, а возможность их осуществления без остановки производства в минимальные сроки с целью снижения экономических потерь предприятия при реконструкции.

Усиление наращиванием сечения целесообразно проводить для относительно ровных элементов. Обеспечение плотного прилегания элемента усиления к усиливаемой конструкции с последующей сваркой позволяет обеспечить в дальнейшем надёжную работу составного сечения и, наоборот, приварка элемента усиления к изогнутой конструкции может свести на нет весь ожидаемый эффект от усиления.

В силу всего вышесказанного предполагается, что речь идёт о расчёте усиления конструкции по вполне определённой схеме с заранее заданными параметрами и при известных воздействиях на неё. В частности, наличие остаточного напряжённого состояния, обусловленного сваркой и другими видами локальных термических воздействий (например, при выравнивании сваркой) будет способствовать увеличению или уменьшению несущей способности, а значит, и увеличению или уменьшению срока службы (ресурса) конструкции.

Основная часть. Особенности расчёта усиливаемых стержневых систем связаны в первую очередь с нарушением естественного характера их деформирования, особенно при усилении под нагрузкой. В

связи с этим основное внимание в дальнейшем будет уделено вопросам определения напряжённо-деформированного состояния (НДС) усиливаемых систем в процессе усиления и последующей работы [1].

Несмотря на упрощения и идеализацию расчётных схем, задачи расчёта усиливаемых конструкций остаются сложными и в большинстве случаев могут быть реализованы только на ЭВМ. Одной из особенностей таких расчётов является необходимость в ряде случаев моделировать и технологию усиления, поскольку она оказывает существенное влияние на работу усиливаемых систем. Численные расчёты позволяют получать решения конкретных задач только при заданных параметрах системы, её начальных и граничных условиях и определённой технологии производства работ. В этом отношении численное моделирование подобно натурному эксперименту, с тем, однако, преимуществом, что оно допускает дифференцированно оценить влияние того или иного фактора (а не их совокупности) на работу усиливаемой конструкции и её элементов [2].

Особое внимание следует обращать на наличие остаточного напряжённого состояния (ОНС). Наличие сварных швов и термических воздействий вызывает появление в элементах металлоконструкций остаточных напряжений (ОН), которые влияют как на устойчивость отдельных элементов, так и на несущую способность и деформативность конструкций в целом. Влияние ОН на устойчивость сжатых элементов неоднозначно. ОН растяжения на кромках повышают устойчивость, а напряжения сжатия снижают её. Степень этого влияния зависит от распределения ОН по сечению и от жёсткости последних.

Между тем существующие расчётные методики, в первую очередь ДБН В.2.6-163:2010 [3] и ДБН В.2.3-14:2006 [4], не учитывают возможности повышения или снижения несущей способности сжатых элементов после наплавки сварных швов на кромках поясов.

Теоретические исследования ОНС в сварных конструкциях, история их развития и степень влияния на несущую способность сварных конструкций подробно рассмотрены в работах [5, 6] и др.

Методики определения напряжённо-деформированного состояния сжатых усиленных элементов с учётом наличия ОНС и его влияния на устойчивость разработаны при следующих предпосылках [1, 5, 6 и др.]:

1. Рассматриваются только продольные напряжения σ_x . Поперечные напряжения σ_y и касательные τ_{xy} считаются равными нулю.

2. Деформации определяются гипотезой плоских сечений.

3. Модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона стали постоянны во всём диапазоне температур.

4. Зависимость предела текучести стали от температуры схематизирована по типу, показанному на рисунке 1. На этом рисунке: T — температура нагрева.

5. Материал элементов (сталь) представляет собой однородный упруго-пластический материал (рис. 2). На этом рисунке: $\varepsilon_{el} = R_y / E_s$ — условная максимальная упругая деформация (R_y , E_s — соответственно расчётное сопротивление и модуль упругости стали).

6. Свариваемые пластины шириной B считаются достаточно длинными, температура по толщине пластины распределяется равномерно [5, 6 и др.].

7. Остаточными напряжениями вследствие прокатки (в общем случае) пренебрегают ввиду их относительной малости, сложной и непредсказуемой ориентации.

8. ОНС (эпюры остаточных напряжений и деформаций) принимаются идеализированными.

9. Исследуется устойчивость II рода (деформации и прогибы растут с начала приложения нагрузки).

10. В случае нагружения многократно повторного, знакопеременного или цикли-

ческого деформирование первоначально происходит в системе координат « $M_1 - \kappa_1$ », разгрузка начинается с точки p_1 и кривизны $\kappa_{p,1}$ ($\kappa_{p,2}, \dots, \kappa_{p,i}$) и жёсткость расчётного сечения в этой точке при разгрузке равна $B_{red} = E_s \cdot I_{red}$, где $E_s \cdot I_{red}$ — «упругая» жёсткость сечения. Деформирование элемента проходит в новой системе координат « $M_{2,1} - \kappa_{2,1}$ » (« $M_{2,2} - \kappa_{2,2}$ », ..., « $M_{2,i} - \kappa_{2,i}$ ») по кривой 2 (рис. 3); нахождение жёсткостей сечений при разгрузке аналогично нахождению жёсткостей при однократном нагружении [8, 9 и др.], т. е.

$$B_{2,i,j} = M_{2,i,j} / \kappa_{2,i,j}, \quad (1)$$

где $B_{2,i,j}$, $M_{2,i,j}$, $\kappa_{2,i,j}$ — соответственно жёсткость, изгибающий момент и кривизна i -го сечения в системе координат « $M_{2,1} - \kappa_{2,1}$ » (« $M_{2,2} - \kappa_{2,2}$ », ..., « $M_{2,i} - \kappa_{2,i}$ »). Индексация в формуле (1): 2 — кривая разгрузки; i — номер этапа разгрузки; j — текущие значения параметров (жёсткости, момента, кривизны) на i -ом этапе разгрузки. При дальнейшем деформировании кривая разгрузки 2 совпадает с кривой 3 нагружения в обратном направлении.

Зависимость « $M - \kappa$ » в системе координат « $M_{2,i} - \kappa_{2,i}$ » с достаточной для расчётов точностью может быть описана кубическим уравнением или аппроксимирована методом наименьших квадратов. Величины изгибающих моментов определяются по обычным правилам строительной механики.

В случае многократно повторного нагружения (рис. 3) после разгрузки (достижения точек $\kappa_{0,1}$, $\kappa_{0,2}$, ..., $\kappa_{0,i}$ на оси абсцисс, для которых $M_0 = 0$) дальнейшее нагружение производится по кривой 4, и начальная жёсткость расчётного сечения в этой точке при дальнейшем нагружении равна $B_{red} = E_s \cdot I_{red}$. Кривая 4 в дальнейшем совпадает с кривой 1.

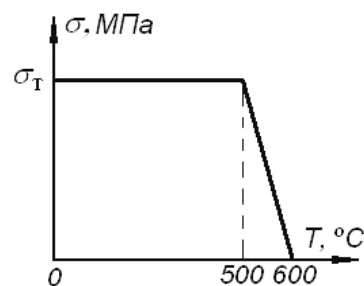


Рисунок 1 Зависимость предела текучести стали от температуры [5, 6]

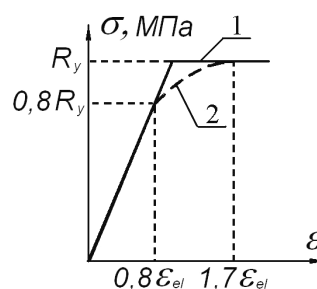


Рисунок 2 Диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » стали [6]: 1 — идеализированная; 2 — унифицированная

11. Закрепление элемента обеспечивает сохранение плоской формы изгиба (изгибно-крутильная форма потери устойчивости невозможна). Возможность изгибно-крутильной формы потери устойчивости оценивается по методике, рекомендованной нормами [3].

12. Деформирование происходит в плоскости меньшей или большей жёсткости.

13. Деформации продольной оси и сближение концов элемента под нагрузкой малы по сравнению с ростом прогиба.

14. Деформированное состояние сечений характеризуется кривизной κ .

15. Предельное состояние элемента считается достигнутым, если:

– достигнут максимум на кривой состояния (предельное состояние первой группы), т. е. выполнен критерий (рис. 4)

$$\frac{dq_1}{df} = 0, \quad (2)$$

где q_1 — модуль вектора силового воздействия; f — характерное перемещение конструкции;

– разрушено сечение элемента (потеря местной устойчивости сжатого пояса, стенки или достигнута максимальная величина деформаций в сжатом поясе — предельное состояние первой группы);

– произошла потеря устойчивости формы, приводящая к затруднению нормальной эксплуатации (предельное состояние второй группы).

16. Появление остаточного прогиба после разгрузки возможно, если материал элемента перешёл в пластическое состояние. Выравнивание возможно путём наплавки холостых валиков на растянутой стороне образцов (рис. 5). Зоны остаточных растягивающих напряжений (ОН) могут быть представлены в виде внешних сил, значения которых изменяются в процессе последующего нагружения (схемы наплавки валиков и распределения ОН после наплавки для некоторых форм сечений приведены на рисунке 6).

Форма изогнутой оси после наплавки может быть описана уравнениями метода начальных параметров, полученными на основе аппроксимации уравнения изогнутой оси кубическим сплайном [6 и др.]. Для этой цели длина элемента L разбивается на

n участков и в каждой i -ой точке разбиения определяется кривизна κ_i . Величины прогнозируемых выгибов y_i и углов поворота φ_i определяются по формулам:

$$y_i = y_1 + \varphi_1 \cdot L \cdot \frac{i-1}{n} + \frac{L^2}{6 \cdot n^2} \times \\ \times \left[(3 \cdot i - 4) \cdot \kappa_1 + 6 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} (i-j) \cdot \kappa_j + \kappa_i \right] + (3) \\ + q_d \cdot (\delta_1 - \delta_i),$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + \frac{L}{2 \cdot n} \cdot (\kappa_1 + 2 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} \kappa_j + \kappa_i). \quad (4)$$

В общем случае рассматривается наплавка холостых валиков на части длины выравниваемого элемента. Кривизну сечения можно определить по формуле (рис. 6)

$$\kappa_i = \frac{\sigma_{res,com}^{(f)} - \sigma_{res,ten}^{(f)}}{E \cdot h}, \quad (5)$$

где h — расстояние между точками сечения, где величины ОН равны $\sigma_{res,com}^{(f)}$, $\sigma_{res,ten}^{(f)}$.

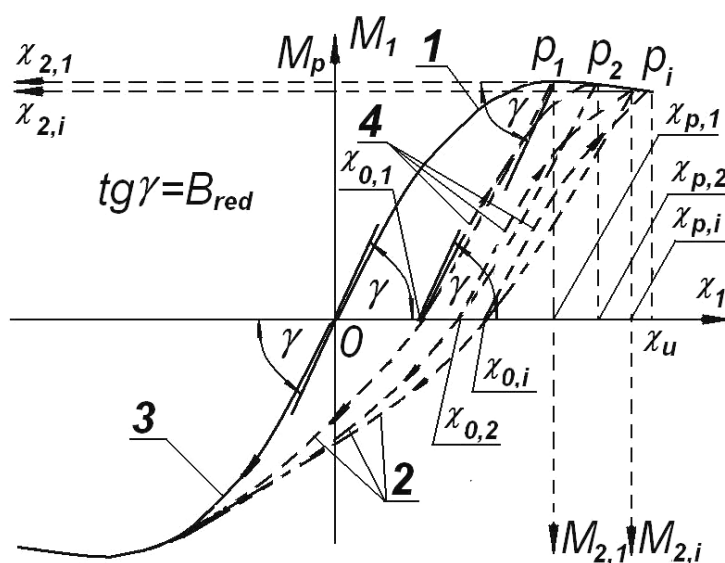


Рисунок 3 Диаграммы « $M - \kappa$ » при многократном, знакопеременном и циклическом режимах нагружения

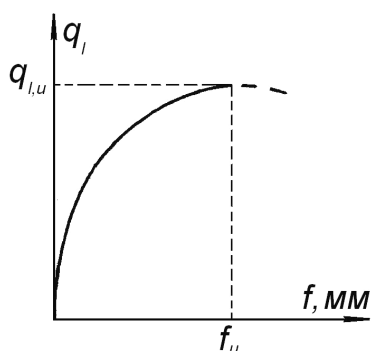


Рисунок 4 Диаграммы состояния системы

Величины ОН в сечении могут быть определены по известным методикам, например [6], с учётом несимметричности наплавки. Длина зоны наплавки L_{weld} , параметры холостого валика и другие технологические параметры процесса устанавливаются методом подбора, с их постепенным изменением для получения прогнозируемого выгиба, величина которого должна быть равна остаточному выгибу элемента после разгрузки.

Выполняем проверку условия

$$0 < \frac{q_{nm}}{A_{mp}} < 625 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{см}^3} \right), \quad (6)$$

где A_{mp} — площадь поперечного сечения трубы, см^2 .

Если условие не выполняется, тогда изменяем длину участков, на которые наплавляют холостые валики, исходя из условия допустимого прогиба, и выполняем расчёт заново.

Определяем величину тока:

$$I_{св} = \frac{v_{св} \cdot q_{nm}}{0,24 \cdot U \cdot \eta}, \quad (7)$$

где $v_{св}$ — скорость сварки, принимают $v_{св} = 1,0 \div 1,2$ см/сек, U — напряжение дуги, принимают $U = 20 \div 36$ В; η — КПД нагрева изделия для дуговой сварки, принимают $\eta = 0,6 \div 0,85$; 0,24 — коэффициент, учитывающий влияние, оказываемое несинусоидальностью кривых напряжения и тока на мощность дуги при сварке на переменном токе.

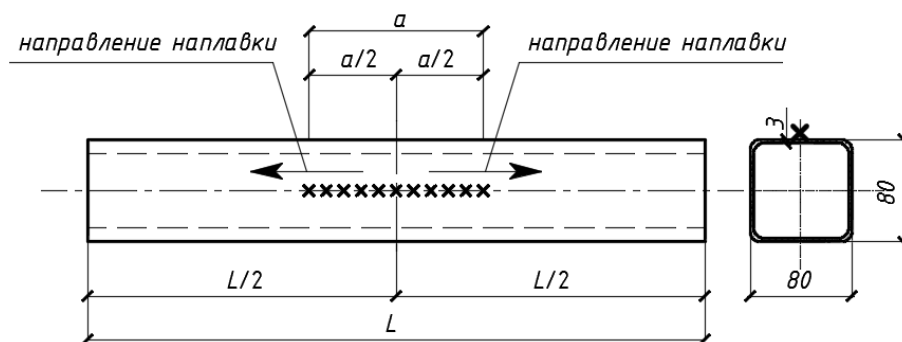


Рисунок 5 Схема расположения и направления наплавки холостых валиков стальных конструкций из труб квадратного сечения

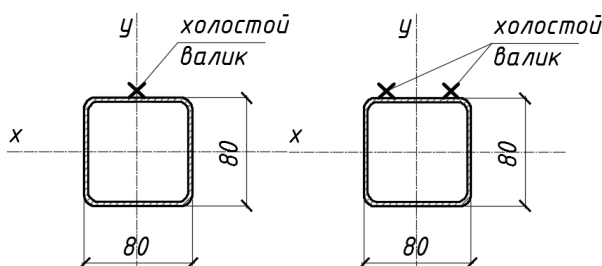


Рисунок 6 Схемы наплавки одного и двух холостых валиков по одной из главных осей стальных конструкций из труб квадратного сечения

В ходе расчётов уточняем длину участков, на которые наплавляется холостой валик, исходя из условия допустимого прогиба.

Данная методика была использована для правки элементов из труб квадратного сечения различной гибкости, которые имели остаточный прогиб после проведения испытания на устойчивость.

Для этого уточнялась стрела остаточного прогиба каждого образца: по длине образца были размечены точки с интервалом 10 см, и в каждой точке при помощи прогибомера определялась величина остаточного прогиба.

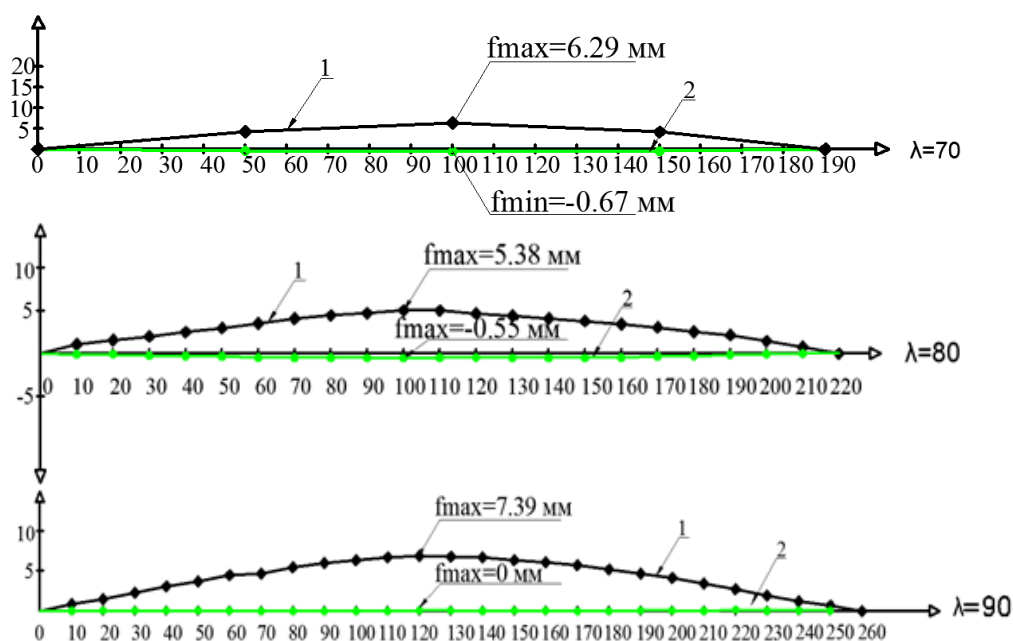
Результаты измерений образцов 1ГК8-2.2 ($\lambda=70$), 2ГК8-2.5 ($\lambda=80$), 3ГК8-2.8 ($\lambda=90$) приведены на рисунке 7. На основе предложенной методики и справочных данных [8] было определено количество теплоты, необходимое для осуществления предварительного напряжения элементов из труб квадратного сечения.

Таким образом, были установлены параметры сварки, необходимые для правки элементов из труб квадратного сечения с

остаточным прогибом. Были приняты электроды типа АНО-21, диаметр которых 3 мм, максимальная сила тока и напряжение достигали 140 А и 30 В соответственно, катет шва — 5 мм, высота шва — 3 мм, общая длина шва — 80 см.

Результаты испытания образцов в состоянии поставки и после правки предварительно испытанных образцов приведены в таблице 1.

Анализ полученных результатов экспериментального определения устойчивости сжатых элементов из труб квадратного сечения показывает, что образцы, предварительно испытанные и подвергнутые правке методом локального термического воздействия путём наплавки холостого валика сварного шва, имеют большее значение критической силы. В ходе экспериментальных исследований установлено, что для образцов с гибкостью $\lambda=70$ величина критической силы повысилась на 13 %, для образцов с гибкостью $\lambda=80$ и $\lambda=90$ — на 35 % и 22 % соответственно.



1 — остаточный прогиб после испытания на устойчивость; 2 — остаточный прогиб после правки сваркой

Рисунок 7 График распределения остаточного прогиба ($f_{ост}$) по длине образцов 1ГК8-2.2 ($\lambda=70$), 2ГК8-2.5 ($\lambda=80$), 3ГК8-2.8 ($\lambda=90$)

Таблица 1

Результаты экспериментальных стоек из труб квадратного сечения в состоянии поставки и после правки

Гибкость, λ	Образец	Экспериментальное значение критической силы, кН	Расчётное значение критической силы при $\sigma_T = 350$ МПа
70	7 ГК8-2.2 в состоянии поставки	192	228
	7 ГК8-2.2 после правки	220	
80	5 ГК8-2.5 в состоянии поставки	160	197,6
	5 ГК8-2.5 после правки	170	
90	9 ГК8-2.8 в состоянии поставки	150	168,5
	9 ГК8-2.8 после правки	170	

Выводы:

1. Остаточный выгиб может возникнуть в сжатых элементах стальных конструкций после разгрузки вследствие перехода материала в пластическое состояние. Это может быть возможным при перегрузке элемента, изменении условий приложения нагрузки, уменьшении площади поперечного сечения вследствие коррозии и т. п.

2. Предложена методика расчёта параметров правки стальных элементов путём наплавки холостых валиков по выпуклым граням.

3. Данная методика позволяет производить регулирование остаточного напряжённого состояния элементов из труб квадратного сечения как на стадии проек-

тирования для создания предварительного напряжения элементов в состоянии поставки, так и для правки элементов, имеющих остаточные прогибы при их усилении.

4. Полученные результаты экспериментального определения несущей способности показывают, что все образцы после правки имели величину критической силы большую, чем у образцов в исходном состоянии.

5. Направление дальнейших исследований состоит в совершенствовании методики расчёта сжатых элементов из труб квадратного сечения с учётом влияния остаточного напряжённого состояния на их устойчивость.

Библиографический список

1. Ребров, И. С. Усиление стержневых металлических конструкций : проектирование и расчёт [Текст] / И. С. Ребров. — Л. : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. — 288 с.

2. Голоднов, А. И. Прогнозируемое выравивание стальных конструкций сваркой [Текст] / А. И. Голоднов, В. В. Псюк, Б. В. Иванов. — Макеевка : Металлические конструкции, 2013. — № 2. — Том 19. — С. 103–110.

3. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель та споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення, монтажу [Текст]. — К. : Мінрегіонбуд України, 2010. — 202 с.

4. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. — К. : Мінбуд України, 2006. — 359 с.

5. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций [Текст] : учеб. пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. — М. : Высш. школа, 1982. — 272 с.

6. Голоднов, А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках [Текст] / А. И. Голоднов. — К. : Сталь, 2008. — 150 с.

7. Голоднов, К. А. Деформируемость сталежелезобетонных балок при различных нагрузках [Текст] / К. А. Голоднов // Дороги і мости : зб. наук. праць. — К. : ДДНДІ ім. М. П. Шульгіна, 2007. — Вип. 7. — Том I. — С. 104–110.

8. Голоднов, К. А. Жёсткость сталежелезобетонных изгибаемых элементов реконструируемых зданий и сооружений [Текст] / К. А. Голоднов // Вісн. Донбас. держ. академії будівництва і архітектури. — Макіївка : ДонДАБА, 2005. — Вип. 8 (56). — С. 65–69.

9. Малышев, Б. Д. Сварка и резка в промышленном строительстве [Текст] / Б. Д. Малышев, А. И. Акулов, Е. К. Алексеев и др. — М. : Стройиздат, 1989. — 590 с. : ил.

© Псюк В. В.

© Никишина И. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПГСиА
ИСАиЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.,
к.т.н., доц., зав. каф. АПИГ ДонГТУ Бондарчуком В. В.*

Статья поступила в редакцию 25.11.19.

к.т.н. Псюк В. В., Никишина И. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПОСИЛЕННЯ І ПРАВКА СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ТРУБ КВАДРАТНОГО ПЕРЕТИНУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗВАРЮВАННЯ

У статті розглядається можливість посилення і правки елементів з труб квадратного перетину різної гнучкості, які мали залишковий прогин після проведення випробування на стійкість. Запропоновано методику розрахунку параметрів правки сталевих елементів шляхом наплавлення холостих валиків на розтягнутій стороні зразків. Зміна залишкового напруженого стану конструкцій після наплавлення зварних швів прогнозується розрахунковим шляхом і підтверджена результатами експериментальних досліджень.

Наведено результати експериментального визначення стійкості стиснутих елементів з труб квадратного перетину в стані поставки і після правки попередньо випробуваних зразків.

Ключові слова: посилення, правка, сталеві конструкції, залишкові напруги, стійкість, квадратний перетин, зварювання.

PhD in Engineering Psiuk V. V., Nikishina I. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

STRENGTHENING AND STRAIGHTENING OF STEEL STRUCTURES MADE OF SQUARE TUBES USING WELDING

The article considers the possibility of strengthening and straightening the square tube elements of different flexibility, which had a residual deflection after the stability test. The design procedure is given for parameters of straightening of steel elements by welding the blank rollers on the stretched side of patterns. The change in the residual stress state of structures after welding is predicted by calculation and confirmed by the results of experimental studies.

The results of experimental determining the stability of the compressed square tube elements in the state of delivery and after straightening of pre-tested patterns are presented.

Key words: strengthening, straightening, steel structures, residual stresses, stability, square section, welding.