

УДК 624.072.002.2

Напряженно-деформированное состояние стальных двутавров после высокотемпературных воздействий на кромках

¹Голоднов А.И., д.т.н., ²Псюк В.В., к.т.н., ³Иванов Б.В.

¹ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского», Украина

²Донбасский государственный технический университет, Украина

³Луганский национальный аграрный университет, Украина

Анотація. Стаття присвячена вирішенню актуального питання – можливості прогнозованого вирівнювання експлуатованих конструкцій за допомогою зварювання. Зміна залишкового напруженого стану експлуатованих конструкцій після зварювання прогнозується розрахунковим шляхом.

Анотация. Статья посвящена решению актуального вопроса – возможности прогнозируемого выравнивания эксплуатируемых конструкций с помощью сварки. Изменение остаточного напряженного состояния эксплуатируемых конструкций после сварки прогнозируется расчетным путем.

Abstract. The article is dedicated to solving of a pressing problem concerning the possibility of predictable smoothing of the constructions being in operation by means of welding. The change of the residual stress state of the constructions being in operation after welding is to be dedicated by means of calculation.

Ключевые слова: эксплуатация конструкций, кромки, высокотемпературные воздействия, остаточный прогиб.

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

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

В то же время искривленные стальные элементы можно выравнивать путем наплавки сварных швов по кромкам или разогрева кромок до температуры выше критической точки АСЗ. Для двутавровых элементов это будут выпуклые кромки полок. Наличие остаточного напряженного

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. Несмотря на упрощения и идеализацию расчетных схем, задачи расчета усиливаемых конструкций остаются сложными и, в большинстве случаев, могут быть реализованы только на ЭВМ. Одной из особенностей таких расчетов является необходимость в ряде случаев моделировать и технологию усиления, поскольку она оказывает существенное влияние на работу усиливаемых систем (порядок наплавки сварных швов при выравнивании может привести как к положительному, так и отрицательному эффекту). Численные расчеты позволяют получать решения конкретных задач только при заданных параметрах системы, ее начальных и граничных условиях, и определенной 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 ее элементов.

Особое внимание следует обращать на наличие остаточного напряженного состояния (ОНС). Наличие сварных швов и подобных термических воздействий вызывают 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 ее. Степень этого влияния зависит от распределения ОН по сечению и от жесткости последних.

Между тем, существующие расчетные методики, в первую очередь, ДБН В.2.6-163:2010 [2] и ДБН В.2.3-14:2006 [3], 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 [4–6].

Методики определения НДС сжатых усиленных элементов с учетом наличия ОНС и его влияния на устойчивость разработаны и получили экспериментальное подтверждение [6].

Форма изогнутой оси после наплавки может быть описана уравнениями метода начальных параметров, полученными на основе аппроксимации уравнения изогнутой оси кубическим сплайном [6]. 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:

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

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

В общем случае рассматривается наплавка холостых валиков на части длины выравниваемого элемента. Кривизну сечения можно определить по формуле:

$$\kappa_i = \frac{\sigma_{res,com}^{(f)} - \sigma_{res,ten}^{(f)}}{E \cdot h}, \quad (3)$$

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

Для подтверждения возможности выравнивания стальных элементов с помощью высокотемпературных воздействий был проведен комплекс исследований [6]. В качестве экспериментальных использованы образцы серий СЛ и СП. Длина образцов составляла 1400 мм, сечения показаны на рис. 1.

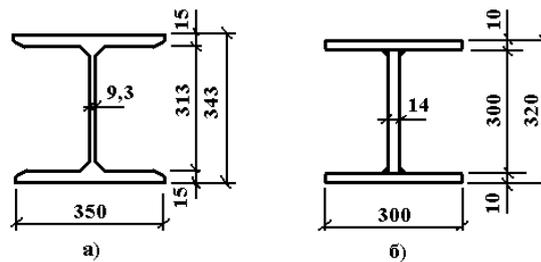


Рис. 1. Сечения экспериментальных образцов серий СП (а) и СЛ (б)

Сварные образцы серии СЛ были изготовлены из металла одной партии. После изготовления стволы длиной 6 м производилась разрезка на мерные длины – 2800 мм (для испытаний на сжатие) и 1400 мм (для определения ОНС).

Регулирование ОНС образцов осуществлялось локальными термическими воздействиями (ЛТВ) путем разогрева двух кромок поясов шириной 20 мм газовым резаком с последующим остыванием на воздухе в такой последовательности:

- образец помещался на стенд, устанавливались приборы и проверялась их работоспособность;
- производился съем начальных отсчетов по приборам;
- производился разогрев на одной из кромок пояса шириной 20 мм газовым резаком до температуры, выше критической точки A_{C3} (850...950 °С) по всей длине (или на части длины) образца; контроль температуры выполнялся с помощью термопар, подключенных к регистрирующей аппаратуре;
- после остывания пояса снимались промежуточные результаты;
- производился аналогичный разогрев другой кромки пояса с записью окончательных результатов после остывания.

Для каждого образца принималась индивидуальная схема регулирования ЛТВ (отработка технологического регламента). Разогрев кромок поясов осуществлялся как по всей длине образца (СЛ-20/3, СП-20/3), так и на части длины 800 мм в центральной части образца (СЛ-20/1, СП-20/4). Величина кривизны определялась по известным правилам строительной механики как отношение разности относительных деформаций на кромках поясов к высоте образца. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов серий СЛ и СП

Серия и номер образца	Деформации поясов, е.о.д.*		Кривизна $\kappa \cdot 10^5, \text{см}^{-1}$	Прогибы кромок поясов, мм		
	сжатого	растянутого		левой	правой	середины
СЛ-20/3	74,7	27,3	3,18	0,59	1,28	0,94
СЛ-20/1	79,1	27,0	3,37	-0,02	1,06	0,52
СП-20/4	68,3	13,4	2,38	0,18	0,72	0,45
СП-20/3	58,1	13,5	2,06	0,38	0,75	0,57

*Примечание: е.о.д. – единицы относительных деформаций

Для проведения разрезки в продольном направлении был изготовлен испытательный стенд, содержащий опорные узлы для испытательного образца, реперную базу для установления индикаторов перемещений, средства фиксации индикаторов.

Регистрация перемещений выполнялась индикаторами часового типа ИЧ-10МН с ценой деления 0,01 мм. Индикаторы были расположены по обе стороны образца на уровне середины ширины поясов (рис. 2).

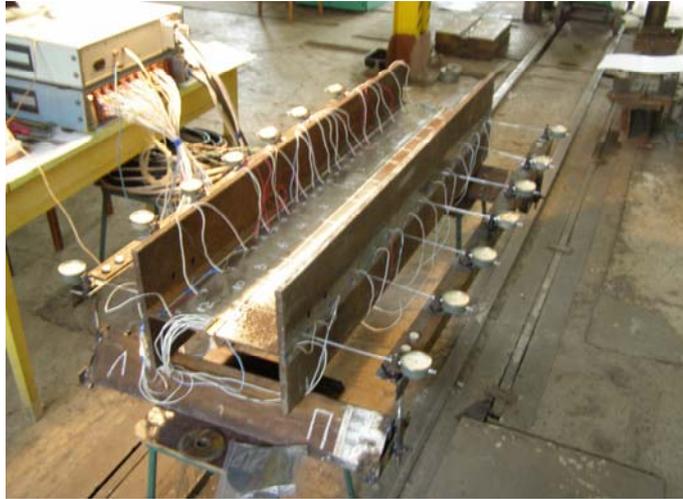


Рис. 2. Общий вид стенда и образца при продольной разрезке

Расположение датчиков выбрано на стенке с отступом 75 мм от внутренней грани поясов и на внешних гранях поясов по оси стенки.

Все операции по подготовке балки к испытанию проводились в такой последовательности:

- разметка мест наклейки тензорезисторов;
- зачистка размеченных мест шлифовальной машиной с последующей доводкой шлифовальной шкуркой;
- обезжиривание и грунтовка зачищенных мест;
- группировка и наклейка тензорезисторов;
- коммутация и проверка работоспособности цепей.

Деформации образцов определялись в такой последовательности.

1. В местах определения деформаций наклеивались тензорезисторы сопротивления типа 2 ПКБ-30-20ХВ на бумажной основе.
2. Тензорезисторы подключались к регистрирующей аппаратуре, и проводился съем начальных результатов (при этом за основу схемы и соединения тензорезисторов принята полумостовая схема с двумя компенсационными сопротивлениями при поочередном подключении активных датчиков). В качестве регистрирующей аппаратуры использована система тензометрическая СИИТ-3.

3. Производилась разрезка участка пояса с одной стороны образца на длину, позволяющую освободить элементы с остаточными напряжениями в пределах одного наклеенного тензорезистора, и производился съём показаний по прибору СИИТ-3.

4. Производилась разрезка участка пояса с другой стороны образца на длину, позволяющую освободить элементы с остаточными напряжениями в пределах одного наклеенного тензорезистора, и производился последующий съём показаний по прибору СИИТ-3.

5. После окончательного роспуска поясов производилась поперечная разрезка стенки двутавра с поэтапным снятием отсчетов по прибору СИИТ-3 в пределах одного тензорезистора.

После каждого этапа выдерживалась пауза продолжительностью 15...20 минут, а затем брались отсчеты по всем тензодатчикам сопротивления исследуемого образца. Окончательный съём показаний производился после полной распиловки образцов и выдержки в течение 24 часов. По результатам измерений установлено, что существенных изменений в размерах после регулирования ЛТВ не произошло.

Распределение деформаций по высоте сечения для обоих образцов в серии после регулирования по разным схемам оказалось весьма близким. Распределение ОН в сечениях образцов после поперечной разрезки показано на рис. 3.

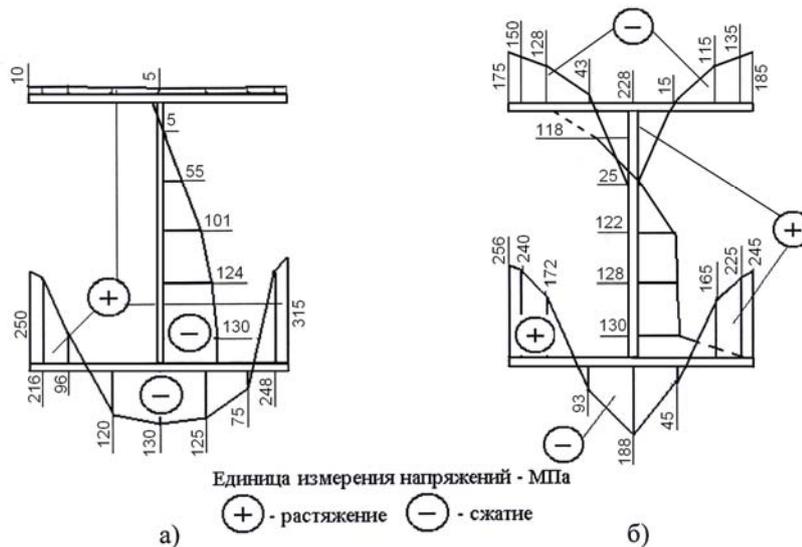


Рис. 3. Распределение ОН в сечениях образцов после регулирования ОНС:
СП-0/3 (а) и СЛ-20/3

После продольной разрезки были определены смещения тавровых элементов один относительно другого, что позволило оценить наличие ОН и их перераспределение в сечениях экспериментальным путем.

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, уменьшения площади поперечного сечения вследствие коррозии и т. п.
2. Выравнивание стальных конструкций возможно путем наплавки сварных швов по выпуклым кромкам или прогрева выпуклых кромок до температуры, выше критической точки A_{C3} .
3. Экспериментально доказана возможность регулирования ОНС для изгибаемых элементов двутаврового сечения путем разогрева двух кромок до температуры, выше критической точки A_{C3} . В элементе после регулирования возникает выгиб. Это качество может быть использовано при включении элементов усиления в работу совместно с усиливаемой конструкцией.
4. Выполнение регулирования ОНС ЛТВ, во избежание неравномерного деформирования, следует производить симметричным разогревом участков поясов источниками тепла одинаковой мощности.

Литература

- [1] Ребров И. С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет / И. С. Ребров – Л. : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. – 288 с.
- [2] Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : ДБН В.2.6-163:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с. – (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [3] Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 359 с. – (Споруди транспорту. Державні будівельні норми України).
- [4] Masubuchi K. Analysis of welded structures. Residual stresses, distortion and their consequences / K. Masubuchi. – London : Pergamon Press, 1980. – 642 p.

- [5] Николаев Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций : учеб. пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Изд-во «Высш. школа», 1982. – 272 с.
- [6] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : Вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.

Надійшла до редколегії 30.05.2013 р.