

УДК 624.015.5

Результаты экспериментального определения остаточного напряженного состояния в сечениях сварных двутавровых элементов

¹Филатова Л.Н., ²Голоднов А.И., д.т.н.

¹Донбасский государственный технический университет, Украина,
²ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского», Украина

Аннотация. Изложены методика и результаты определения остаточного напряженного состояния в элементах двутаврового сечения. Были исследованы образцы предварительно напряженные, в состоянии поставки и после регулирования остаточного напряженного состояния.

Анотація. Викладено методику і результати визначення залишкового напруженого стану в елементах двотаврового перерізу. Було досліджено зразки попередньо напружені, у стані постачання та після регулювання залишкового напруженого стану.

Abstract. The method and results of determination of the remaining tense consisting is expounded of elements of I-section. Standards were investigational preliminary tense, in a state of delivery and after adjusting of the remaining tense state.

Ключевые слова: остаточное напряженное состояние, предварительное напряжение, регулирование.

Введение. Постановка вопроса. Предварительное напряжение используется в различных конструкциях. Необходимость его диктуется различными целями: расширением области упругой работы материала, перераспределением усилий, уменьшением деформативности, повышением устойчивости и т.п. Предварительное напряжение может осуществляться на стадии изготовления, монтажа или в процессе эксплуатации [1, 2, 3, 4, 5].

Методы предварительного напряжения конструкций на стадии изготовления можно разделить на три группы [1, 4]:

- затяжные методы с использованием дополнительных элементов типа затяжек;
- беззатяжные методы, основанные на предварительном деформировании элементов с последующей фиксацией сваркой;
- методы предварительного напряжения путем локальных термических воздействий (ЛТВ).

К беззатяжечным относится метод предварительного напряжения вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева. Предварительное напряжение осуществляется путем приварки к стенке двух поясов (для колонн) или одного нижнего пояса (для балок), которые перед сваркой поясных швов разогреваются газовыми горелками до заданной температуры. После сварки и остывания в поясах возникают остаточные растягивающие напряжения, а в стенке – уравнивающие их сжимающие [2, 3, 4].

Целью работы является разработка методики и проведение экспериментальных исследований остаточного напряженного состояния (ОНС) в сварных двутавровых элементах, возникающего при различных технологиях изготовления и регулирования.

Основная часть. Экспериментальные исследования проводились для получения данных о характере распределения остаточных напряжений (ОН) в сварных элементах одинакового сечения, но с различными технологиями изготовления и регулирования остаточного напряженного состояния (ОНС) и для последующей проверки теоретических предпосылок.

В качестве экспериментальных использованы сварные и прокатные двутавровые образцы-колонны (прокатные серии СП и сварные серии СЛ). Длина образцов составляла 1400 мм, сечение показано на рис. 1.

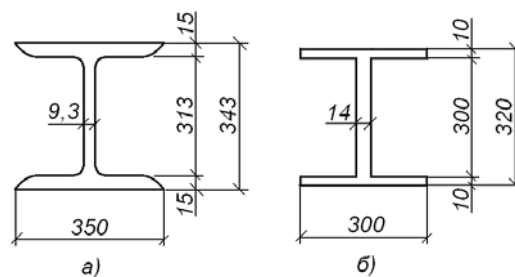


Рис. 1. Сечения экспериментальных образцов серий СП (а) и СЛ (б)

Образцы серии СП (рис. 1, а) были изготовлены путем разрезки ствола из широкополочного двутавра 35К1 на мерные длины – 2800 мм (для испытаний на сжатие) и 1400 мм (для определения ОНС).

Образцы серии СЛ (рис. 1, б) были изготовлены: пояса – из стали марки Ст3сп5, стенка – из стали марки 16Г2АФ-12. После изготовления стволов длиной 6 м, как и в случае с образцами серии СП, производилась разрезка на мерные длины – 2800 мм (для испытаний на сжатие) и 1400 мм (для определения ОНС).

Регулирование ОНС в образцах серий СЛ и СП осуществлялось 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. Схема размещения приборов приведена на рис. 2;
- 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} ($850...950^{\circ}\text{C}$) по всей длине (или на части длины) образца. Контроль температуры выполнялся с помощью термопар, подключенных к регистрирующей аппаратуре;
- после остывания пояса производился съем промежуточных результатов;
- производился аналогичный разогрев другой кромки пояса с записью окончательных результатов после остывания.

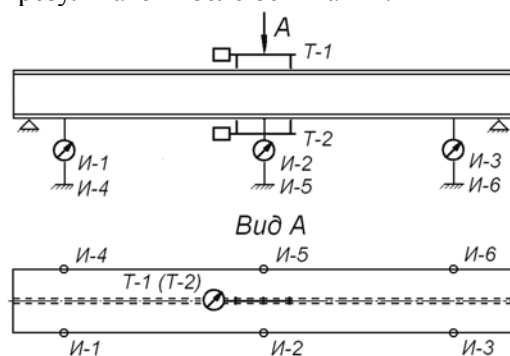


Рис. 2. Схема размещения приборов на образцах:

Т-1, Т-2 – приборы ИГМ-10 для измерения деформаций в верхней и нижней частях сечения; И-1, ..., И-6 – приборы ИЧ-10МН для измерения прогибов

Для каждого образца принималась индивидуальная схема регулирования ОНС. Разогрев кромок поясов осуществлялся как по всей длине образца (СЛ-20/3, СП-20/3), так и на участке длиной 800 мм в центральной части (СЛ-20/1, СП-20/4). Величины кривизны определялись по правилам строительной механики как отношение разности относительных деформаций на кромках поясов к высоте образца. Результаты измерений приведены в таблице.

Таблиця

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

Кроме этих исследований были выполнены исследования стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса (серия БСУ). Подбор сечений балок производился на основе разработанных расчетных методик [4] и предложений. Длина балок составляла 2820 мм, сечение показано на рис. 3.

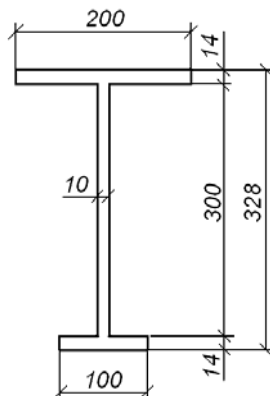


Рис. 3. Сечение экспериментальной балки серии БСУ, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса

Изготовление предварительно напряженной балки серии БСУ было выполнено в такой последовательности.

1. На первом этапе по заводской технологии собирались верхний пояс и стенка в тавр. С помощью упругих металлических пластин закреплялся нижний пояс. Сборка контролировалась измерениями геометрических размеров.
2. На втором этапе собранный образец помещался в стенд и закреплялся в горизонтальном положении на упорах. Для измерения температурных деформаций в точке начала движения нагревательных устройств разогреваемый нижний пояс со стенкой скреплялись сварочной скрепкой.

Нижний пояс разогревался двумя горелками. Одновременно с разогревом шел процесс сварки двух швов. Температурные деформации измерялись прогибомером ПАО–6. Скорость сварки была равна 28...30 см в минуту.

Контроль температуры осуществлялся термопарами, впаянными в среднем сечении пояса, с последующей записью на регистрирующий прибор КСП-4.

Сварка двух швов синхронно выполнялась двумя полуавтоматами кремнемаргонцовой проволокой в среде углекислого газа катетом 5 мм.

3. На третьем этапе образец извлекался из стенда. Два оставшихся шва варились в освобожденном состоянии.

Стадия полной готовности определялась разрезкой на проектные длины, приваркой ребер жесткости и маркировкой по сериям. Балка, изготовленная с предварительным напряжением, имела предварительный выгиб 5,5 мм.

Все экспериментальные образцы были изготовлены на ДЗМК им. И.В. Бабушкина в 1981 году.

Исследования ОНС всех образцов проведены разрушающим методом с использованием тензорезисторов сопротивления и регистрирующей аппаратуры (системы СИИТ-3 с кабелями и коммутаторами). Это позволило получить распределение ОН в элементах путем измерения деформаций после разрезки и переводом показаний прибора в напряжения умножением на коэффициент тензочувствительности. Его величина ($k=0,376$ МПа) определена путем тарировки на консольной тарировочной балке с переменным сечением, нагруженной силой на свободном конце.

Подготовка балок к испытанию проводилась 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 электрических цепей.

Группировка и наклейка тензорезисторов выполнялись согласно инструкции для принятых типов датчиков клеем БФ-2.

С учетом поставленной задачи в выборе средств измерения можно выделить следующие этапы:

- подбор первичной аппаратуры;
- согласование и выбор вторичной аппаратуры;

- схема соединений;
- сборка и проверка измерительного тракта.

Схема наклейки тензорезисторов приведена на рис. 4.

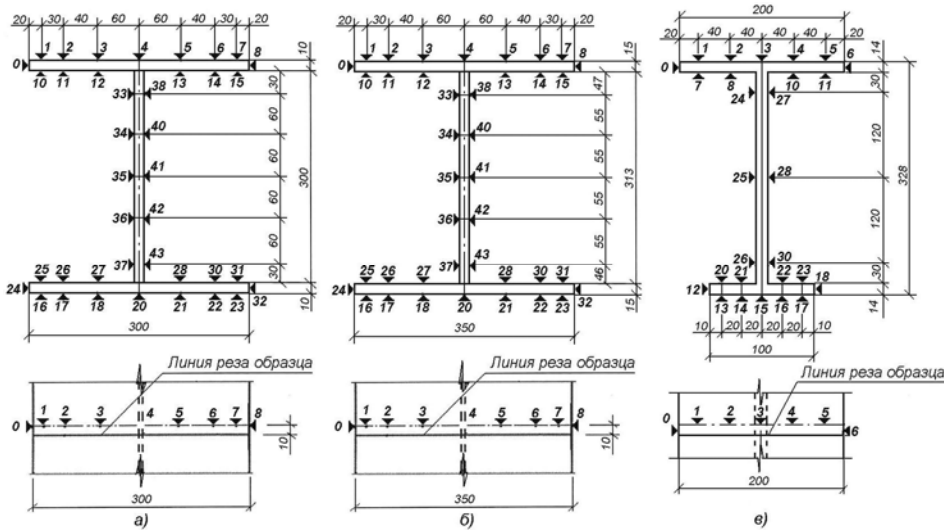


Рис. 4. Схема наклейки тензорезисторов на образцах серии СЛ (а), СП (б) и БСУ (в)

Деформации образцов определялись таким образом:

1. В местах определения деформаций наклеивались проволочные 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 использовалась система тензометрическая СИИТ-3.
3. Производилась разрезка участка пояса с одной стороны образца на длину, позволяющую освободить элементы с ОН в пределах одного наклеенного тензорезистора, и производился съем показаний по прибору СИИТ-3.
4. Производилась разрезка участка пояса с другой стороны образца на длину, позволяющую освободить элементы с ОН в пределах одного наклеенного тензорезистора, и производился последующий съем показаний по прибору СИИТ-3.

5. После окончательного распуска 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 съем показаний производился после полной распиловки балок и выдержки в течение 24 часов.

На рис. 5 (а, б) приведены эпюры ОН, полученные в образцах серий СП (а) и СЛ (б) после разрезки. На рис. 6 приведена эпюра ОН, полученная в предварительно напряженной балке серии БСУ после разрезки.

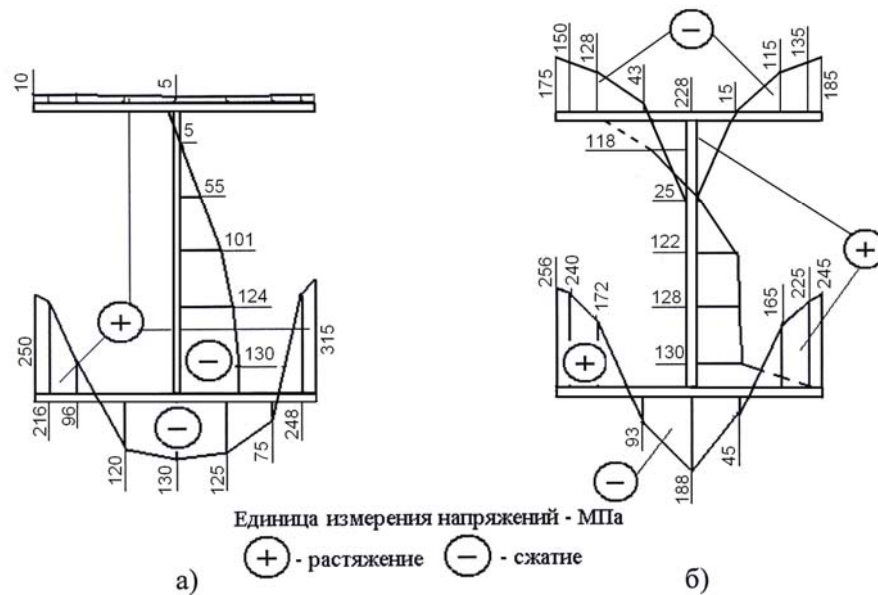


Рис. 5. Распределение ОН в сечениях образцов серий СП (а) и СЛ (б) после регулирования ОНС и поперечной разрезки

Полученные в ходе проведенных экспериментальных исследований данные позволяют проверить положения разработанной методики расчета сжатых элементов с наплавкой валиков на части длины.

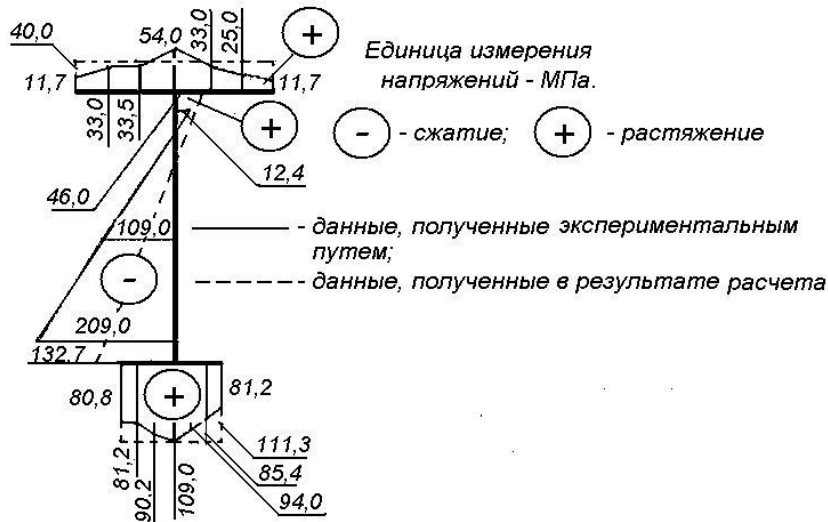


Рис. 6. Распределение ОН в сечении образца серий БСУ после поперечной разрезки

Выводы

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований ОНС, возникающего в двутавровых элементах после регулирования путем разогрева кромок поясов до температуры, выше критической точки A_{C3} . ОНС определялось разрушающим методом путем разрезки образцов в поперечном направлении. В ходе исследований изучалось распределение ОН по сечению образца.
2. Впервые полученные в ходе проведения экспериментальных исследований данные позволили установить, что для сварных двутавровых образцов после регулирования ОНС путем разогрева двух кромок на одном поясе происходит изменение характера ОН – на кромках возникают остаточные растягивающие напряжения, а в районе поясных сварных швов остаточные сжимающие напряжения. В ходе регулирования для образца серии СЛ остаточные растягивающие напряжения в зоне сварных швов были ликвидированы. В образцах серий СЛ и СП стенка получила изгиб, а сами образцы – остаточный выгиб.
3. Получены данные о распределении ОН по сечению предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса (упреждающим разогревом) балки серии БСУ. Эти данные свидетельствуют о наличии относительно равномерного распределения ОН в нижнем поясе, что связано с применением упреждающего разогрева.

4. Полученные в ходе проведенных экспериментальных исследований данные позволяют проверить положения разработанной методики расчета сжатых элементов с наплавкой валиков на части длины.

Литература

- [1] Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 150 с.
- [2] А.с. 729327 СССР, МКИ Е04 С 21/12. Способ предварительного напряжения металлических колонн / И.И. Набоков, Е.П. Лукьяненко, В.А. Нелидов, В.А. Муляев (СССР); Опубл. 25.04.80, Бюл. № 14. – 2 с.
- [3] А.с. 1527393 СССР, МКИ Е04 С 3/10. Способ изготовления предварительно напряженной металлической балки / А.И. Голоднов, Е.П. Лукьяненко, И.И. Набоков (СССР); Опубл. 07.12.89, Бюл. № 45. – 2 с.
- [4] Методические рекомендации по применению облегченных предварительно напряженных сварных двутавров для реконструкции промышленных предприятий / НИИСП Госстроя УССР; Сост. И.И. Набоков, А.И.Голоднов, Е.П.Лукьяненко и др. – К.: НИИСП, 1988. – 45 с.

Надійшла до редколегії 03.06.2012 р.