

УДК 624.072.002.2

Остаточные напряжения в стальных двутавровых элементах после разгрузки и выравнивания

¹Голоднов А.И., д.т.н., ²Иванов Б.В.

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

²Луганский национальный аграрный университет, Украина

Анотація. Викладено методику досліджень залишкових напружень, які виникають в зварних конструкціях після навантаження і розвантаження. Наведені пропозиції щодо вирівнювання конструкцій шляхом наплавлення валиків. Запропоновано методику оцінювання напружено-деформованого стану конструкцій після вирівнювання. Наведено результати експериментального визначення залишкових напружень після розвантаження і вирівнювання.

Аннотация. Изложена методика исследований остаточных напряжений, которые возникают в сварных конструкциях после нагружения и разгрузки. Даны предложения по выравниванию конструкций путем наплавки валиков. Предложена методика оценки напряженно-деформированного состояния конструкций после выравнивания. Приведены результаты экспериментального определения остаточных напряжений после разгрузки и выравнивания.

Abstract. Methodology of researches of residual stresses which arise up in weldments after lading and unloading is expounded. Suggestions are given on smoothing of constructions by beading. Methodology of estimation of the tensely deformed state of constructions is offered after smoothing. Results over of experimental determination of residual stresses are brought after unloading and smoothing.

Ключевые слова: стальные элементы, остаточные напряжения, разгрузка, выравнивание.

Введение. Постановка проблемы. В процессе нагружения и последующей разгрузки, особенно после перехода материала в пластическое состояние, в конструкциях возникает остаточное напряженное состояние (ОНС), которое сопровождается остаточным выгибом. Очевидно, что дальнейшая надежная эксплуатация конструкций при нагружении возможна после исключения остаточного выгиба путем выравнивания.

Способов выравнивания, включая усиление путем наращивания сечения, существует много, однако не все способы можно применить к реальным конструкциям. В частности, не всегда удастся увеличить сечение из-за стесненности или наличия оборудования рядом с конструкцией. К тому же приварка элементов усиления способствует изменению ОНС, что может существенно отразиться на несущей способности конструкций. Это обстоятельство особенно важно учитывать при проектировании усиления строительных конструкций [1, 2].

Методика експериментальних досліджень розроблена для отримання даних о характере розподілення остаточних напружень (ОН) в сеченнях сварних конструкцій після нагрівання і розгрівання, остаточних вигибів, обґрунтування можливості вирівнювання конструкцій путем наплавки сварних швів і оцінки впливу наслідків такого вирівнювання на несущую здатність сталевих елементів.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Робота посилюваних конструкцій надзвичайно складна і залежить від багатьох факторів як конструктивного, так і технологічного характеру. При розробці методів розрахунку посилюваних конструкцій це обумовлює необхідність відмови від урахування ряду второстепенних факторів і внесення спрощуючих передумов [1].

Вибір схеми посилення стержневих конструкцій є багатоваріантною задачею. Ураховуючи сучасний рівень розвитку методів розрахунку і проектування конструкцій, а також різноманітність можливих схем і прийомів посилення, розробка загального підходу до завдань оптимізації представляється справою майбутнього. Розв'язання завдань оптимізації ускладнюється ще і тим, що основним критерієм оптимальності посилення зазвичай є не економія матеріалу або зниження вартості комплексу робіт по посиленню, а забезпечення найбільшої його технологічності. При цьому під технологічністю розуміється не зручність виконання робіт, а можливість їх виконання без зупинки виробництва в мінімальні терміни з метою зниження економічних втрат підприємства при реконструкції [1].

Посилення нарощуванням сечення цілесообразно проводити для відповідно рівних елементів. Забезпечення щільного прилягання елемента посилення до посилюваної конструкції з наступною сваркою дозволяє забезпечити в подальшому надійну роботу складного сечення і, навпаки, приварка елемента посилення до вигнутої конструкції може призвести до «втраченого» всього очікуваного ефекту від посилення.

В силу всього вищесказанного передбачається, що мова йде про розрахунок посилення конструкції за повністю визначеною схемою з заздалегідь заданими параметрами і при відомих впливах на неї. В окремих випадках, наявність остаточного напруженого стану, обумовленого сваркою і іншими видами локальних термічних впливів (наприклад, при вирівнюванні сваркою) може сприяти збільшенню або зменшенню несущої здатності, а значить і збільшенню або зменшенню терміну служби (ресурсу) конструкції.

Цель работы. Целью настоящих исследований является экспериментальное определение ОН в стальных конструкциях после нагружения и разгрузки разрушающим методом (путем разрезки в поперечном направлении) и обоснование возможности выравнивания конструкций путем наплавки сварных швов на выпуклых кромках.

Основная часть. В качестве образцов для экспериментального изучения распределения ОН после нагружения и разгрузки, а также выравнивания путем наплавки сварных швов и последующей оценки такого вида регулирования ОНС на несущую способность конструкций были приняты экспериментальные образцы, которые были испытаны на устойчивость [2, 3]. Они были изготовлены путем распиловки прокатных двутавров № 12 по ГОСТ 8239-89 на мерные длины: 800, 1200 и 1400 мм. Всего было изготовлено 3 серии по 4 образца в каждой. В пределах серии каждый образец имел разную длину наплавленного шва в центральной части, а именно 0,2, 0,4 и 0,6 длины элемента. Кроме этого, в первой и третьей сериях были использованы образцы без наплавленных валиков, т. е. без регулирования ОНС (контрольные образцы). Образцы длиной 800 мм и 1200 мм были изготовлены из одной партии металла. Образцы длиной 1400 мм были изготовлены из двух партий металла: в образцах первой партии длина наплавленного валика была 0,2 и 0,4 длины элемента, а в образцах второй партии – 0,6 длины элемента и без наплавки. Два образца из металла первой партии длиной 600 мм были предназначены для определения ОНС в сечениях колонн до и после наплавки валиков на части длины. Регулирование ОНС было выполнено в средней части длины элементов путем наплавки валиков по кромкам поясов. Наплавка валиков выполнена полуавтоматом в среде углекислого газа. Для этого была использована сварочная проволока диаметром 0,8 мм, сила тока 90А, вид тока – постоянный. Отклонения по длине элементов не превышали ± 5 мм.

Для выполнения поставленных задач при испытаниях образцов двутаврового сечения на устойчивость в плоскости меньшей жесткости была разработана и изготовлена соответствующая оснастка и съемные опорные приспособления, с помощью которых оказалось возможным выполнить центрирование элемента или создать заданный эксцентриситет. Испытания проводились с эксцентриситетом 10 мм. Такой эксцентриситет принят с целью контроля направления изгиба при приложении нагрузки. Линейные перемещения образцов определялись индикаторами часового типа ИЧ-10 в двух горизонтальных направлениях в верхнем и нижнем закреплении. В центре для определения перемещений были установлены три прогибомера ПАО-6, в т. ч. один – для измерения перемещений в плоскости меньшей жесткости и два в плоскости большей жесткости по двум сторонам элемента. Показания тензорезисторов сопротивления снимались с помощью системы СИИТ-3.

Проведение испытаний каждого образца выполнялось в такой последовательности:

- образец устанавливался в исходное положение;
- с помощью индикаторов ИЧ-10 выставлялся эксцентриситет приложения нагрузки;
- выполнялся съем начальных показаний по приборам ПАО-6 и СИИТ-3 без нагрузки;
- образец загружался начальной нагрузкой для проверки работоспособности приборов и качества центрирования;
- после проверки работоспособности приборов и качества центрирования выполнялось поэтапное нагружение с выдержкой на каждом этапе. Для образцов серии Д-3 ($\lambda = 111$) нагружение выполнялось этапами по 800 кг до нагрузки 8 т и дальше этапами по 400 кг до потери устойчивости. Для образцов серий Д-1 ($\lambda = 67$) и Д-2 ($\lambda = 96$) нагружение выполнялось следующим образом: первый этап 5 т, потом этапами по 2 т до нагрузки 13 и 11 т (соответственно для образцов Д-1 и Д-2). После достижения величин 13 и 11 тонн этапная нагрузка снижалась и составляла 1 тонну до потери несущей способности;
- на каждом этапе нагружения снимались показания по приборам;
- для контроля хода эксперимента по показателям ПАО-6 и шкалы пресса строился график зависимости «нагрузка-прогиб», а также строились эпюры напряжений в сечениях по данным СИИТ-3 (перевод показаний прибора в напряжения выполнен с помощью коэффициента тензочувствительности, величина которого была определена по результатам тарирования на балке равного сопротивления);
- эксперимент продолжался до потери образцом несущей способности (в качестве критерия истощения несущей способности был принят рост прогибов без увеличения нагрузки);
- по окончании эксперимента для всех образцов было выполнено сравнение результатов для каждой серии и по всем сериям в целом.

Общий вид всех испытанных образцов приведен на рис. 1 [2, 3].

После проведенных испытаний на сжатие образцы были осмотрены и измерены с целью определения остаточных выгибов. Были отобраны образцы для испытаний на определение ОНС (наиболее деформированные образцы в каждой серии в количестве 1 шт.) разрушающим методом. Остальные образцы были выровнены путем наплавки холостых валиков по растянутому кромкам или с помощью пресса (таблица 1). Длина сварного шва была определена по методике, изложенной в работе [1].

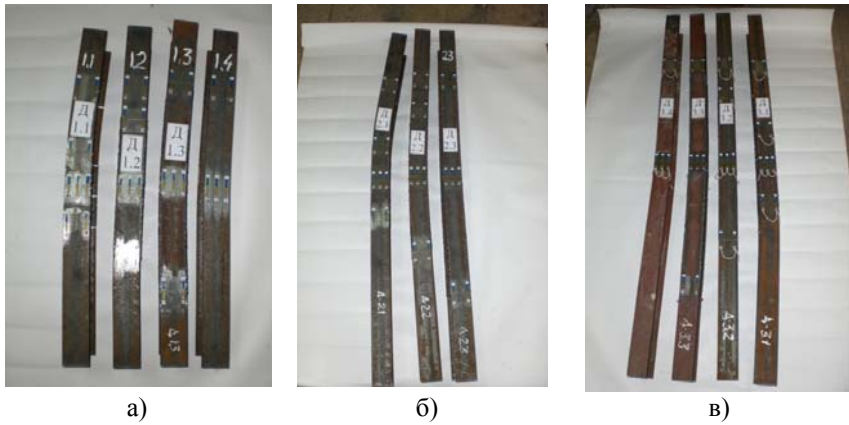


Рис. 1. Общий вид образцов после испытаний на сжатие:
а) – образцы серии Д-1; б) – образцы серии Д-2; в) – образцы серии Д-3

Таблица 1

Программа исследования образцов типа ДП

Старая маркировка	Новая маркировка	Количество
Д 1.1	1 ДП (п)	1
Д 1.2	2 ДП (он)	1
Д 1.3	3 ДП (п)	1
Д 1.4	4 ДП (с)	1
Д 2.1	5 ДП (он)	1
Д 2.2	6 ДП (п)	1
Д 2.3	7 ДП (с)	1
Д 3.1	8 ДП (он)	1
Д 3.2	9 ДП (с)	1
Д 3.3	10 ДП (п)	1
Д 3.4	11 ДП (с)	1

Условные обозначения:

1÷11 – порядковый номер образца;

Д – сечение образца: двутавр;

П – форма прокатки : прокатный;

(он) – образец для определения остаточных напряжений;

(п) – правка с помощью прессы;

(с) – правка с помощью сварки.

Все операции по подготовке образца к испытанию на определение ОНС были проведены в такой последовательности:

- размечались места наклейки тензорезисторов;
- зачищались размеченные места шлифовальной машиной с последующей доводкой шлифовальной шкуркой;
- обезжиривались зачищенные места (обезжиривание ацетоном проводилось до тех пор, пока на тампоне из белой ваты не оставалось следов грязи и ржавчины);
- группировались и наклеивались тензорезисторы;
- выполнялась коммутация и проверка работоспособности электрических цепей.

Программа исследований образцов приведена в таблице 1.

Деформации при определении ОНС определялись в такой последовательности.

1. В местах определения деформаций наклеивались проволоочные тензорезисторы сопротивления в последовательности, изложенной выше.
2. Тензорезисторы подключались к регистрирующей аппаратуре и выполнялся съем начальных результатов (при этом за основу схемы и соединения тензорезисторов была принята полумостовая схема с двумя компенсационными сопротивлениями при поочередном подключении активных датчиков). В качестве регистрирующей аппаратуры была использована 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 выполнялся 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 выполнялся последующий съем показаний по прибору СИИТ-3.
5. После роспуска поясов была произведена 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 был произведен после полной разрезки образцов и выдержки в течении 24 часов.

Выравнивание образцов было выполнено путем наплавки холостых валиков на выпуклых кромках. Для каждого образца была принята индивидуальная схема наплавки валиков. Наплавка валиков была

выполнена обратнo-ступенчатым швом участками длиной не более 150 мм. Для этого была использована сварочная проволока диаметром 0,8 мм, сила тока 90А, вид тока – постоянный, по аналогии с ранее выполненной наплавкой при изготовлении образцов.

После выравнивания часть образцов (по одному образцу из каждой серии) была отобрана для испытаний на определение ОНС по методике, изложенной выше (таблица 1). Некоторые результаты испытаний приведены на рис. 2, 3, 4.



Рис. 2. Образец 2 ДП (он) перед
разрезкой

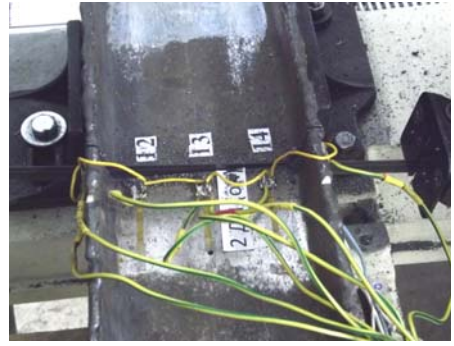


Рис. 3. Образец 2 ДП (он) в ходе
разрезки

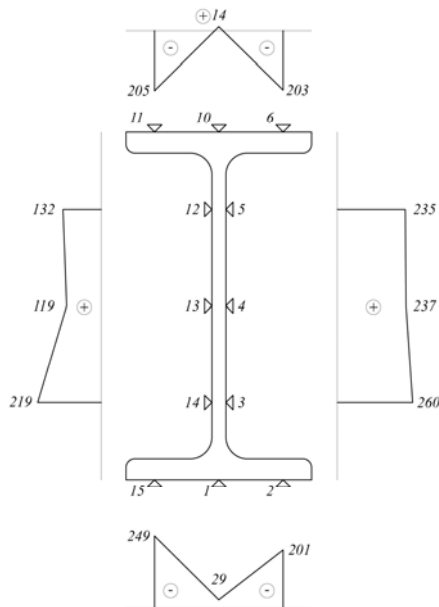


Рис. 4. Распределение ОН в сечении образца 2 ДП (он) после разрезки (МПа)

Остальные образцы были испытаны на устойчивость по методике, которая была разработана для исследований образцов на сжатие [3]. Испытания проводились с использованием тех же приспособлений и с теми же эксцентриситетами, которые были использованы при первичных испытаниях, т. е. схема деформирования образца соответствовала той, которая приведена в работе [3].

После проведения испытаний сравнить полученные результаты и сделать вывод о целесообразности такого вида выравнивания и регулирования ОНС.

Выводы

1. Разработана методика экспериментальных исследований ОНС, возникающего в стальных элементах двутаврового профиля после нагружения, разгрузки и последующего выравнивания различными способами. ОНС определялось путем разрезки образцов в поперечном направлении.
2. Предложена методика выравнивания стальных элементов путем наплавки холостых валиков по выпуклым кромкам поясов. Такая методика выравнивания позволяет исключить остаточный выгиб и обеспечить дальнейшую надежную работу конструкций под нагрузкой.
3. Впервые получены результаты экспериментального определения ОНС, возникающего в стальных элементах двутаврового профиля после выравнивания различными способами.

Литература

- [1] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : «Сталь», 2008. – 150 с.
- [2] Голоднов А. И. Определение остаточных напряжений в стальных конструкциях после разгрузки и выравнивания / А. И. Голоднов, С. И. Скребцов, Б. В. Иванов // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. тр. / Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса: ОГАСиА, 2013. – № 17. – Часть 1. – С. 62–67.
- [3] Скребцов С. И. Результаты экспериментальных исследований устойчивости элементов из прокатных двутавров после регулирования остаточного напряженного состояния на части длины / С. И. Скребцов, А. П. Иванов, А. И. Голоднов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. – Дн-вск : ПГАСА, 2010. – Вып. 56. – С. 494–499.

Надійшла до редколегії 30.11.2016 р.