

УДК 624.072.002.2

## **Несущая способность стальных двутавровых элементов после разгрузки и выравнивания**

<sup>1</sup>Голоднов А. И., д-р техн. наук, <sup>2</sup>Иванов Б. В.

<sup>1</sup>ООО «Укринсталькон им. В. Н. Шимановского», Украина,

<sup>2</sup>Луганский национальный аграрный университет, Украина

**Аннотация.** Изложена методика исследований несущей способности стальных двутавровых элементов после нагружения, разгрузки, последующего выравнивания и нагружения. В качестве экспериментальных использованы образцы с различными видами регулирования остаточного напряженного состояния, которые были испытаны на сжатие. После испытаний экспериментальные образцы были подвержены выравниванию под прессом или путем наплавки холостых валиков по выпуклым кромкам. Такие способы выравнивания позволили получить образцы для дальнейших испытаний с незначительными выгибами. Приведены результаты экспериментального определения несущей способности образцов после разгрузки и выравнивания. Результаты испытаний показали, что несущая способность для большинства образцов после выравнивания оказалась не ниже, чем несущая способность образцов, полученная при начальных испытаниях. Причем образцы, выравнивание которых производилось под прессом, как и ожидалось, показали большую несущую способность, чем образцы, которые выравнивались путем наплавки холостых валиков.

**Ключевые слова:** стальные элементы, остаточное напряженное состояние, разгрузка, выравнивание, несущая способность.

**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 конструкций [1, 2].

Методика экспериментальных исследований разработана для получения данных о характере распределения остаточных напряжений (ОН) в сечениях сварных конструкций после нагружения и разгрузки, остаточных выгибов, обоснования возможности выравнивания конструкций путем наплавки

сварных швов и оценки влияния последствий такого выравнивания на несущую способность стальных элементов.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Работа усиливаемых конструкций чрезвычайно сложна и зависит от множества факторов как конструктивного, так и технологического характера. В первую очередь, факторами влияния на несущую способность для стальных конструкций могут быть ОН, которые возникают при изготовлении. Поэтому при разработке методов расчета усиливаемых конструкций подобное обстоятельство обуславливает необходимость отказа от учета ряда влоростепенных факторов и внесения упрощающих предпосылок [1, 2].

Выбор схемы усиления стержневых конструкций является многовариантной задачей. Учитывая современный уровень развития методов расчета и проектирования конструкций, а также многообразие возможных схем и приемов усиления, разработка общего подхода к задачам оптимизации представляется делом будущего. Решение задач оптимизации осложняется еще 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 [1].

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

В силу всего вышесказанного предполагается, что речь идет о расчете усиления конструкции по вполне определенной схеме с заранее заданными параметрами и при известных воздействиях на нее. В частности, 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.

**Цель работы.** Целью настоящих исследований является экспериментальное определение несущей способности стальных конструкций после нагружения, разгрузки, выравнивания под прессом или путем наплавки валиков на выпуклых кромках и последующего нагружения.

**Основная часть.** В качестве образцов для экспериментального изучения несущей способности стальных элементов после нагружения, разгрузки, выравнивания путем наплавки холостых валиков и последующего нагружения были приняты экспериментальные образцы, которые были испытаны на устойчивость [2]. 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, то есть, 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 90 А, вид тока – постоянный. Отклонения по длине элементов не превышали  $\pm 5$  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 том числе, 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 съём 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 исчерпания 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.

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 растянутым кромкам или с помощью пресса (таблица 1 [2]). Длина сварного шва была определена по методике, изложенной в работе [1]. Результаты испытаний приведены в работе [2].

**Программа исследования образцов**

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

*Условные обозначения:*

- 1÷11 – порядковый номер образца;
- Д – сечение образца «двутавр»;
- П – форма прокатки «прокатный»;
- (п) – правка с помощью прессы;
- (с) – правка с помощью сварки.

Выравнивание образцов было выполнено путем наплавки холостых валиков на выпуклых кромках. Для каждого образца была принята индивидуальная схема наплавки валиков. Наплавка валиков была выполнена обратноступенчатым швом участками длиной не более 150 мм. Для этого была использована сварочная проволока диаметром 0,8 мм, сила тока 90 А, 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 [2]. Остальные образцы были испытаны на устойчивость по методике, которая была разработана для исследований образцов на сжатие [2]. Испытания проводились с использованием тех же приспособлений и с теми же эксцентриситетами, которые были использованы при первичных испытаниях, то есть схема деформирования образца соответствовала той, которая приведена в работе [2]. Результаты испытаний приведены в таблице 2 и на рисунках 1-6.

Таблиця 2

**Сопоставление величин несущей способности**

Серия и номер образца (таблица 1)	$R_y^f$ , МПа	$H$ , см	$\lambda$	Несущая способность, кН	
				$P_{u,1}$	$P_{u,2}$
1	2	3	4	5	6
Д-1.1/1 ДП (п)	290	92,5	67	163	178
Д-1.3/3 ДП (п)	292	92,5	67	178	198
Д-1.4/4 ДП (с)	290	92,5	67	154	158
Д-2.2/6 ДП (п)	290	132,5	96	135	160
Д-2.3/7 ДП (с)	290	132,5	96	145	140
Д-3.2/9 ДП (с)	280	152,5	111	121	144
Д-3.3/10 ДП (п)	363	152,5	111	135	147
Д-3.4/11 ДП (с)	369	152,5	111	127	120

*Примечание:* в обозначениях несущей способности (столбцы 5, 6)  $P_{u,1}$ ,  $P_{u,2}$  индекс 1 отвечает несущей способности для образцов при первичном нагружении, индекс 2 отвечает несущей способности образцов после выравнивания.

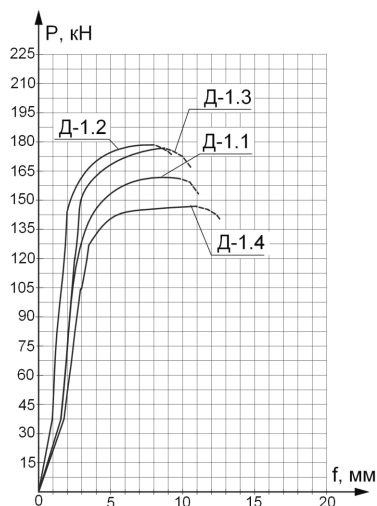


Рис. 1. Зависимости «P–f» для образцов серии Д-1:

- Д-1.1 – образец с длиной шва 0,2 L (первая партия);
- Д-1.2 – образец с длиной шва 0,4 L (первая партия);
- Д-1.3 – образец с длиной шва 0,6 L (первая партия);
- Д-1.4 – образец без наплавки валиков (первая партия)

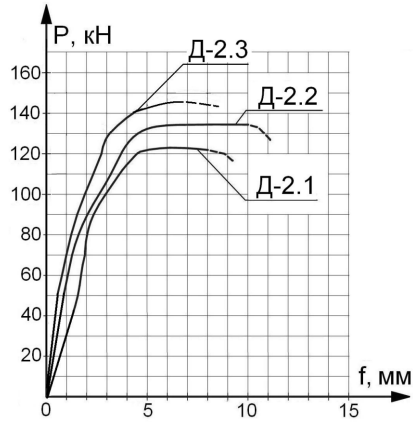


Рис. 2. Зависимости «Р–f» для образцов серии Д-2:  
Д-2.1 – образец с длиной шва 0,2 L (первая партия);  
Д-2.2 – образец с длиной шва 0,4 L (первая партия);  
Д-2.3 – образец с длиной шва 0,6 L (первая партия)

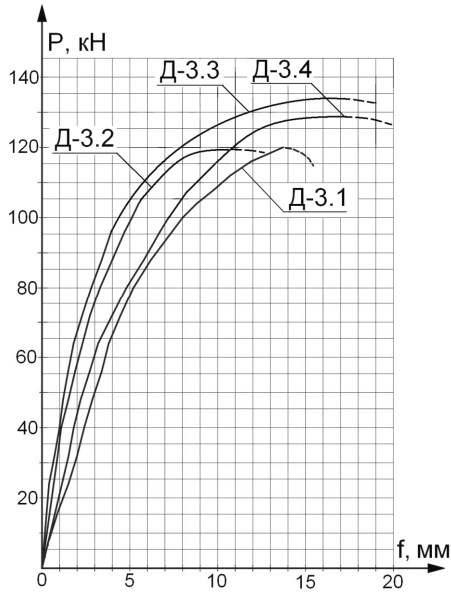


Рис. 3. Зависимости «Р–f» для образцов серии Д-3:  
Д-3.1 – образец с длиной шва 0,2 L (первая партия);  
Д-3.2 – образец с длиной шва 0,4 L (первая партия);  
Д-3.3 – образец с длиной шва 0,6 L (вторая партия);  
Д-3.4 – образец без накладки валиков (вторая партия)

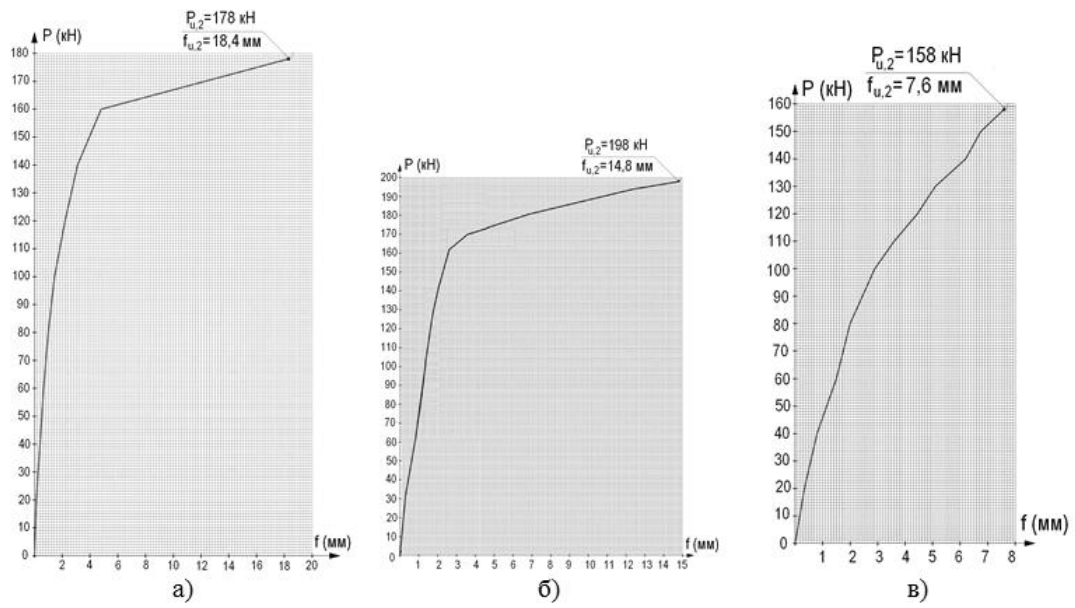


Рис. 4. Зависимости «P–f» для образцов длиной 925 мм:  
а) образец 1 ДП (п); б) образец 3 ДП (п); в) образец 4 ДП (с)

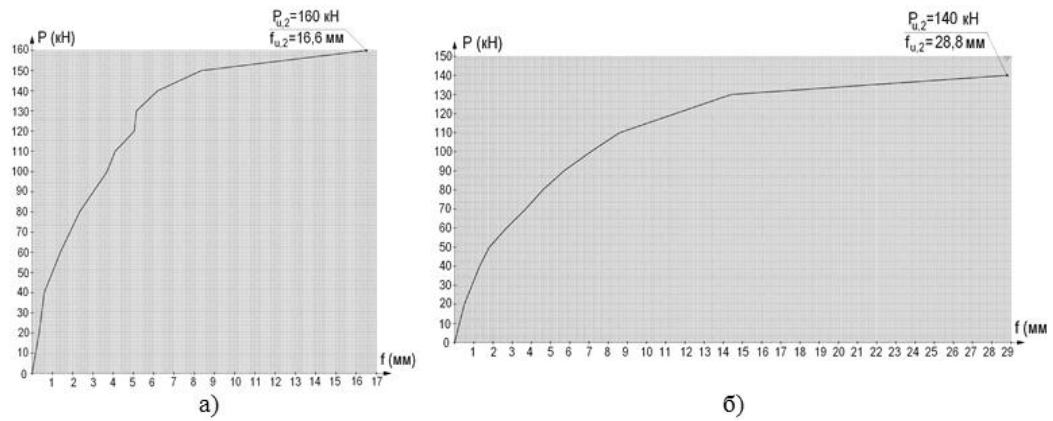


Рис. 5. Зависимости «P–f» для образцов длиной 1325 мм:  
а) образец 6 ДП (п); б) образец 7 ДП (с)



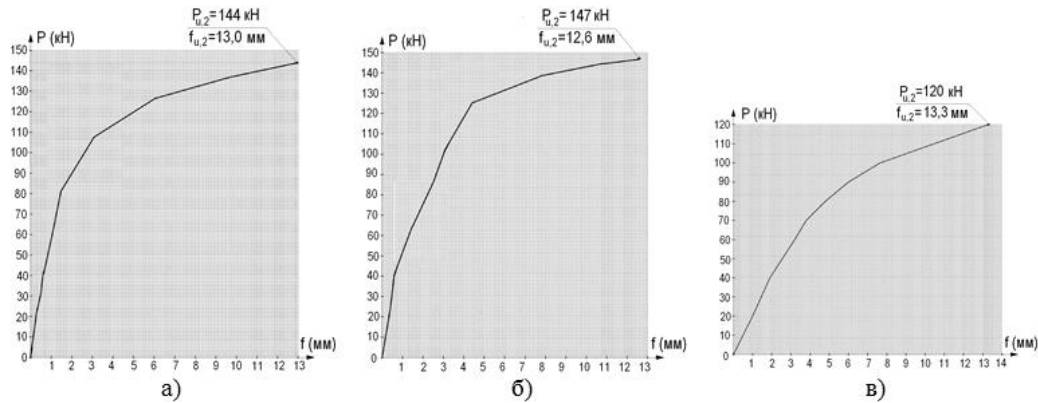


Рис. 6. Зависимости «P–f» для образцов длиной 1525 мм:  
а) образец 9 ДП (с); б) образец 10 ДП (п); в) образец 11 ДП (с)

Как следует из приведенных материалов, несущая способность для большинства образцов после выравнивания оказалась не ниже, чем несущая способность образцов, полученная при начальных испытаниях. Причем образцы, выравнивание которых производилось под прессом, как и ожидалось, показали большую несущую способность, чем образцы, которые выравнивались путем наплавки холостых валиков.

## Выводы

1. Разработана методика исследований несущей способности стальных двутавровых элементов после нагружения, разгрузки, последующего выравнивания и нагружения. В качестве экспериментальных использованы образцы с различными видами регулирования остаточного напряженного состояния, которые были испытаны на сжатие. После испытаний экспериментальные образцы были подвержены выравниванию под прессом или путем наплавки холостых валиков по выпуклым кромкам. Такие способы выравнивания позволили получить образцы для дальнейших испытаний с незначительными выгибами.

2. Приведены результаты экспериментального определения несущей способности образцов после разгрузки и выравнивания. Результаты испытаний показали, что несущая способность для большинства образцов после выравнивания оказалась не ниже, чем несущая способность образцов, полученная при начальных испытаниях. Причем образцы, выравнивание которых производилось под прессом, как и ожидалось (под прессом образцы выравнивались до практически идеально ровного состояния), показали

большую несущую способность, чем образцы, которые выравнивались путем наплавки холостых валиков.

### **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. Остаточные напряжения в стальных двутавровых элементах после разгрузки и выравнивания / А.И. Голоднов, Б. В. Иванов // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К. : Видавництво «Сталь», 2016. – № 17. – С. 95–102.

## **Несуча здатність сталевих двотаврових елементів після розвантаження і вирівнювання**

<sup>1</sup>Голоднов О. І., д-р техн. наук, <sup>2</sup>Іванов Б. В.

<sup>1</sup>ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського», Україна,  
<sup>2</sup>Луганський національний аграрний університет, Україна

**Анотація.** Викладено методику досліджень несучої здатності сталевих двотаврових елементів після навантаження, розвантаження, подальшого вирівнювання і навантаження. В якості експериментальних використано зразки з різними видами регулювання залишкового напруженого стану, які були випробувані на стиск. Після випробувань експериментальні зразки були піддані до вирівнювання під пресом або шляхом наплавлення холостих валиків по опуклих кромках. Такі способи вирівнювання дозволили отримати зразки для подальших випробувань з незначними вигинами. Наведено результати експериментального визначення несучої здатності зразків після розвантаження і вирівнювання. Результати випробувань показали, що несуча здатність для більшості зразків після вирівнювання виявилася не нижчою, ніж несуча здатність зразків, що була отримана при початкових випробуваннях. Причому зразки, вирівнювання яких здійснювалося під пресом, як і очікувалося, показали більшу несучу здатність, ніж зразки, які вирівнювалися шляхом наплавлення холостих валиків.

**Ключові слова:** сталеві елементи, залишковий напружений стан, розвантаження, вирівнювання, несуча здатність

## **Load-bearing capacity of steel double-t elements after unloading and alignment**

<sup>1</sup>O. Holodnov, Dr. Sc. (Eng.), <sup>2</sup>B. Ivanov

<sup>1</sup>V. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction, Ukraine,  
<sup>2</sup>Lugansk National Agrarian University, Ukraine

**Abstract.** Methodology of researches of bearing strength of steel double-T elements is expounded after loading, unloading, subsequent alignment and loading. Samples with

various kinds of residual stress regulation were used as experimental ones, which were tested for compression. After the tests, the experimental samples were subjected to alignment under the press or by fusing single rollers over protuberant edges. Such methods of alignment allowed the samples to be obtained for further tests with minor bends. The results of the experimental determination of the load-carrying capacity of samples after unloading and alignment are given. The test results showed that the bearing capacity for most samples after alignment was not lower than the load capacity of the samples obtained during the initial tests. Moreover, the samples aligned under the press, as expected, showed a greater load-bearing capacity than samples that were aligned by surfacing single rollers.

**Keywords:** steel elements, remaining tense state, unloading, smoothing, bearing strength

*Надійшла до редколегії 28.12.2017 р.*