



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2013, ТОМ 19, НОМЕР 1, 49–58

УДК 6624.072.2

(13)-0282-1

## **ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРФОРОВАНОЇ БАЛКИ З ГАРАНТОВАНОЮ ЕПЮРОЮ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ В УМОВАХ ЗАВОДІВ ВИРОБНИКІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

**В. М. Василев, Ю. І. Дозоренко**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.  
E-mail: mailbox@dgasa.dn.ua*

*Отримана 6 лютого 2013; прийнята 22 лютого 2013.*

**Анотація.** Ця стаття присвячена питанням виготовлення балок з перфорованою стінкою. Розглянуто технологію виготовлення перфорованих балок, що виключає випрямлення таврових елементів балок перед складанням. Особливу увагу приділено впливу температурного нагріву на внутрішні напруження та їх перерозподіл, запропоновані схеми розпуску прокатного профілю на заготовки за допомогою газових пальників, наведена принципова блок-схема програми «Розпуск». Наведено теоретичні епюри внутрішніх напружень на всіх стадіях виготовлення, а також підсумкову епюру внутрішніх напружень у перфорованій балці після виготовлення. Дана робота спрямована на подальші дослідження напруженого стану перфорованих балок, враховуючи запропоновану технологію їх виготовлення.

**Ключові слова:** перфорований профіль, напружений стан, пластичні деформації, розпуск, зигзагоподібний різ, балки жорсткості, залишкові напруження.

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЕРФОРИРОВАННЫХ БАЛОК С ГАРАНТИРОВАННОЙ ЭПЮРОЙ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАВОДОВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦИЙ**

**В. Н. Васильев, Ю. И. Дозоренко**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.  
E-mail: mailbox@dgasa.dn.ua*

*Получена 6 февраля 2013; принята 22 февраля 2013.*

**Аннотация.** Данная статья посвящена вопросам изготовления балок с перфорированной стенкой. Рассмотрена технология изготовления перфорированных балок, исключая правку тавровых элементов балок перед сборкой. Особое внимание уделено влиянию температурного нагрева на внутренние напряжения и их перераспределение, предложены схемы роспуска прокатного профиля на заготовки при помощи газовых горелок, приведена принципиальная блок-схема программы «Роспуск». Приведены теоретические эпюры внутренних напряжений на всех стадиях изготовления, а также результирующая эпюра внутренних напряжений в перфорированной балке после изготовления. Данная работа направлена на дальнейшие исследования напряженного состояния перфорированных балок, учитывая предложенную технологию их изготовления.

**Ключевые слова:** перфорированный профиль, напряженное состояние, пластические деформации, роспуск, зигзагообразный рез, балки жесткости, остаточные напряжения.

## MANUFACTURING DESIGNS PERFORATED BEAMS WITH GUARANTEED DISTRIBUTION DIAGRAMS OF THE INTERNAL STRESSES IN STEEL MANUFACTURING PLANTS

**Volodymyr Vasylev, Yulia Dozorenko**

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.  
E-mail: mailbox@dgasa.dn.ua*

*Received 6 February 2013; accepted 22 February 2013.*

**Abstract.** This article is devoted to the production of beams with a perforated wall. The technology of production of perforated beams, excluding editing tee beam elements before assembly. Particular attention is paid to the influence of temperature on heating the internal stresses and their redistribution schemes of the dissolution profile of the rolling on a workpiece by means of gas burners, shows a schematic block-diagram of the «dissolution». The theoretical diagrams of internal stress at all stages of manufacture and the resulting internal stresses in the diagram of the perforated beam after fabrication. This work aims to further study the stress state of perforated beams, taking into account the proposed technology of their manufacture.

**Keywords:** perforated, stress, plastic deformation, dissolution, zig-zag cut, beam hardness, residual stresses.

### Актуальность темы

Конструкции из развитых по высоте двутавров с отверстиями в стенке экономичнее аналогичных прокатных двутавров по расходу металла и стоимости, несмотря на некоторое увеличение затрат на изготовление конструкции.

По сравнению со сварными двутаврами эти конструкции имеют меньшую протяженность сварных швов и длину реза. От решетчатых конструкций небольших пролетов при практически одинаковой массе они отличаются простотой конструкции и малоэлементностью, малой строительной высотой покрытия и лучшей транспортабельностью [3].

Применение перфорированных конструкций сдерживается спецификой их технологии изготовления, которая отличается от традиционной технологии изготовления строительных металлоконструкций [9].

Для резки прокатного профиля широко применяются аппараты лазерной и плазменной резки, обеспечивающие высокую скорость резки балок с минимальными тепловложениями, а также высокое качество реза.

При изготовлении данных конструкций используется способ и оборудование, не допускающие деформации в разрезаемых элементах в процессе и после резки профиля и исключая

ющие тем самым правку элементов конструкции перед сборкой. С этой целью полки прокатного профиля до резки прикрепляются к продольным жестким элементам (балок жесткости) и все последующие операции по резке и сборке балки производятся совместно с этими элементами, обеспечивая прямолинейность половин профиля в течение всего технологического процесса.

В процессе роспуска двутавра тавры получают искривления в плоскости стенки за счет реализации внутренних напряжений, данные недостатки исправляются на правильных машинах, тем самым увеличивая трудоемкость изготовления. Более того, в ряде случаев не удается получить абсолютно ровные элементы, что затрудняет последующую сборку их в конструкцию [3].

### Работа балок с перфорированной стенкой при изгибе в плоскости стенки

В перфорированных балках распределение внутренних напряжений гораздо сложнее, чем в обычных прокатных балках.

Отверстия в стенке меняют картину напряженного состояния.

Распределение нормальных напряжений в стенке балки по середине простенка близко к линейному, а у отверстий в угловых зонах воз-

никают концентраторы напряжений и эпюра меняет вид (рис. 1).

Подобная концентрация напряжений приводит к возникновению микротрещин, а в некоторых случаях к снижению несущей способности балки.

Традиционная технология не позволяет изготавливать изделия с низким (безопасным) уровнем напряжений, поэтому необходимы дополнительные приемы, позволяющие снижать и стабилизировать напряжения.

Учитывая внутреннее напряженное состояние, возникающее в балке в процессе работы, была предложена следующая схема формирования внутреннего напряженного состояния: в процессе изготовления, до начала роспуска стенки, предлагается выполнять предварительный подогрев стенки исходного двутавра таким образом, чтобы после резки в таврах была сформирована эпюра продольных напряжений, которая обеспечила бы снижение напряжений в местах концентрации, перераспределение на-

пряжений в сечении и прямолинейность тавров после реза стенки.

Были выбраны две схемы роспуска:

1. Роспуск по схеме № 1, где стенка исходного двутавра до начала реза прогревается одной плазменной горелкой, движущейся вдоль стенки двутавра с расчетной скоростью (рис. 2). Данная схема дает возможность создать собственные внутренние напряжения сжатия в зоне концентраторов напряжений нижнего тавра балки.
2. Роспуск по схеме № 2, где стенка исходного двутавра до начала реза прогревается двумя плазменными горелками, расположенными на расстоянии  $A$  от продольной оси двутавра, движущимися вдоль стенки двутавра с расчетной скоростью (рис. 3). По этой схеме в районе отверстий создаются напряжения растяжения в зоне концентраторов верхнего пояса.

Перфорированная балка состоит из двух балок таврового сечения (поясов), свариваемых

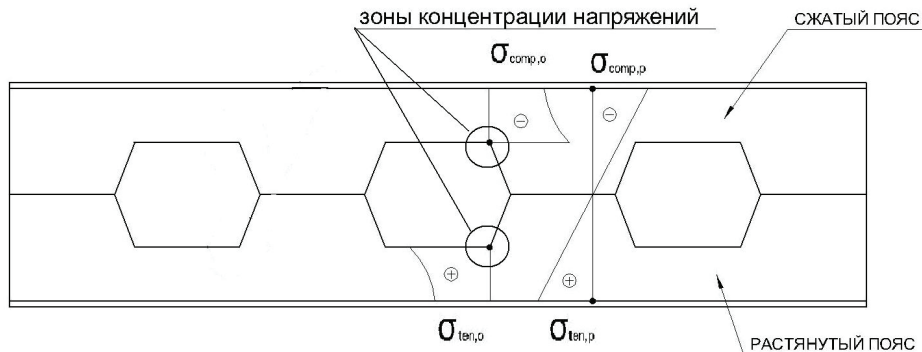


Рисунок 1. Распределение нормальных напряжений в стенке балки.

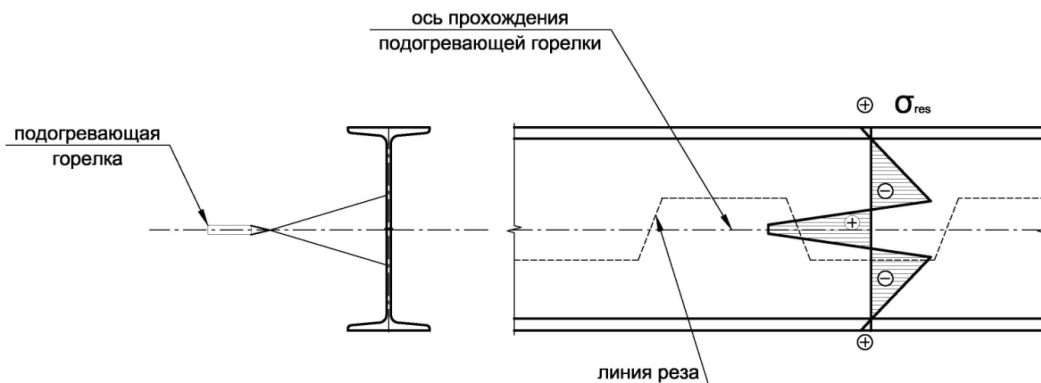


Рисунок 2. Роспуск балок по схеме № 1.

между собой, предлагается изготовление тавров, используемых в качестве верхнего пояса, выполнять по схеме № 2, а нижнего пояса – по схеме № 1.

Суммарная эпюра внутренних напряжений представлена на рис. 4.

### Выбор способа изготовления балок

В работе использован термический способ снижения и перераспределения напряжений в процессе изготовления строительных металлоконструкций. Этот способ позволяет создать такие эпюры внутренних напряжений, которые могли бы учитывать и компенсировать все недостатки, возникающие при изготовлении и работе балки с перфорированной стенкой.

В исходном состоянии двутавр имеет большой уровень внутренних напряжений, эти на-

пряжения возникают в профиле в процессе их охлаждения на холодильниках. В результате в профиле образуется поле внутренних напряжений, которое имеет следующие особенности: в середине стенки двутавра преобладают сжимающие напряжения, которые по мере приближения к полкам уменьшаются и постепенно переходят в растягивающие, сами полки также находятся в сложном напряженном состоянии, в месте сопряжения со стенкой возникают растягивающие напряжения, постепенно меняющиеся на напряжения сжатия на краях полок. Такое сложное внутреннее напряженное состояние профиля значительно влияет на работу его в составе конструкции и доставляет массу сложностей при различных технологических процессах [4, 8, 10].

Однако особенности технологического процесса не позволяют изготавливать изделия с

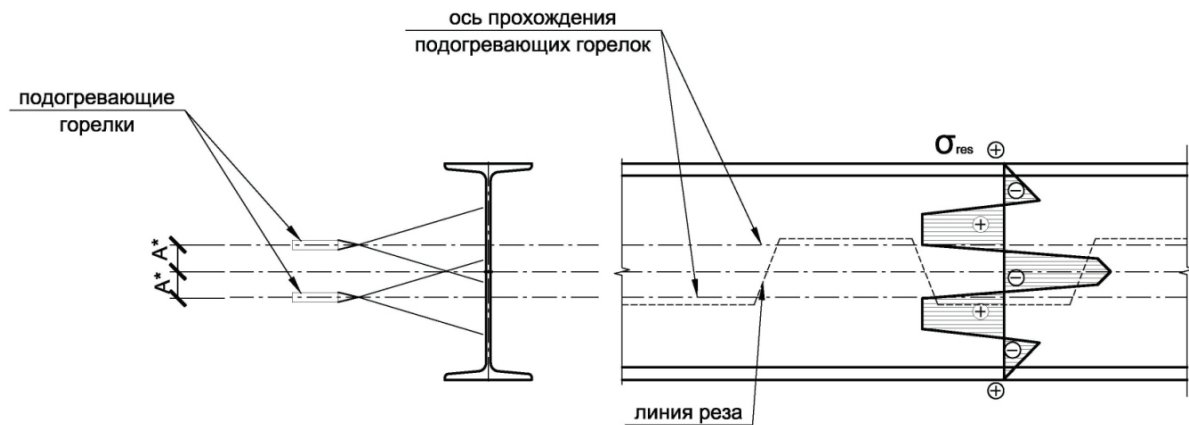


Рисунок 3. Роспуск балок по схеме № 2.

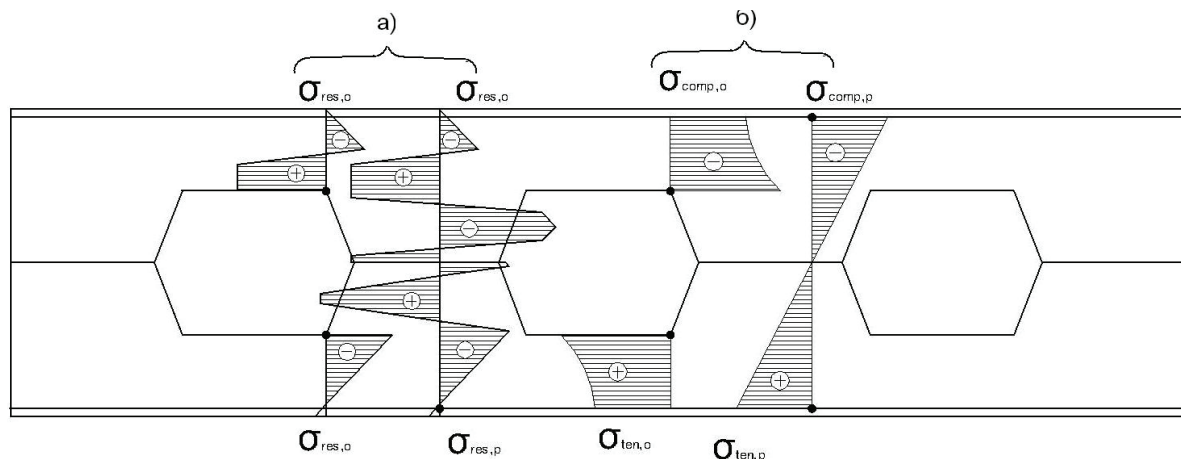


Рисунок 4. Теоретическая эпюра внутренних напряжений в перфорированной балке: а) в простенке в зонах концентраторов напряжений верхнего и нижнего тавров; б) эпюра напряжений в процессе работы балки.

низким (безопасным) уровнем напряжений, поэтому необходимо использовать дополнительные приемы, позволяющие снижать и стабилизировать напряжения.

Создание такого технологического процесса, который может обеспечивать получение изделий и полуфабрикатов с низким уровнем внутренних напряжений, релаксация которых в готовых изделиях и перераспределение при механической обработке полуфабрикатов не будут приводить к заметным изменениям формы-размеров, является достаточно актуальным.

Так, в процессе изготовления перфорированной балки искривление тавровых профилей после реза происходит за счет изменения уровня собственных внутренних напряжений профиля. В процессе реза двутавра реализуются сжимающие напряжения в стенке и растягивающие напряжения в центральной части полки. Такая схема уравнивания эпюры внутренних напряжений и приводит к искривлению тавров со стрелкой прогиба со стороны полки [1–4, 6–8, 10, 11].

Следовательно, для получения прямого тавра необходимо, чтобы была сформирована такая эпюра продольных внутренних напряжений, которая обеспечивала бы их прямолинейность. Это перераспределение можно выполнить за счет пластических деформаций укорочения в элементах распускаемого двутавра.

В основе предложенного метода лежит термический способ, позволяющий рационально создать зону пластических деформаций укорочения вдоль центральной части распускаемого двутавра. Зона формируется за счет опережающего подогрева стенки двутавра плазменными горелками [6].

В этом случае используется напряженное состояние двутавра: сжимающие внутренние напряжения суммируются с тепловыми сжимающими напряжениями. Это обстоятельство, а также большая жесткость стенки в плоскости двутавра позволяют добиться необходимого уровня пластических деформаций при температуре 250–360 °С [1].

#### **Изготовление конструкции в условиях завода**

Изготовление балок с перфорированной стенкой выполнялось на Макеевском металлургическом заводе.

В качестве исходного профиля был выбран прокатный двутавр № 36 по ГОСТ 8239-89, длиной 11,2 м.

Для изготовления балки с перфорированной стенкой были выбраны две схемы распуска балок с предварительным подогревом (рис. 2–3).

Для реализации метода бездеформационного распуска прокатного двутавра в качестве подогревающих элементов были выбраны плазменные горелки с номерами наконечников № 1 установки плазменной резки с ЧПУ модели ROVEN PTF/OXI/24025/HPR260/TIN/M2/27/20XI/JM450/R12. В программе установки ROVEN задавались следующие характеристики: скорость предварительного подогрева, эффективная мощность горелки, а также параметры реза стенки.

Определение эффективной мощности горелок выполнялось калориметрическим способом экспериментальным путем на заводской площадке непосредственно перед прогревом балок.

Для выполнения измерения использовалось следующее оборудование: круглый образец диаметром 150 мм из стали марки С245 толщиной 20 мм, сосуд для воды объемом 5 литров, термометр и секундомер.

Определение эффективной мощности выполнялось следующим образом [5]:

- образец укладывался на бетонные подкладки таким образом, чтобы основная часть его нижней поверхности граничила с воздухом;
- далее нагревали образец горелкой в течение 40 сек, медленно перемещая горелку по кругу диаметром 20 мм в центре образца;
- затем горелку убрали, одновременно опускаемая образец в сосуд с 5 литрами воды; затем в течение минуты образец перемещали в воде, после чего замерялась температура воды в сосуде (замер температуры воды необходимо производить также до нагрева образца).

Для того, чтобы образец можно было перемещать в нагретом состоянии, к нему приварили сбоку арматуру ф6мм длиной 500 мм.

Эффективная мощность определялась как частное от деления общего количества тепла, переданного горелкой образцу за 40 сек, на длительность нагрева:

$$q_e = 140 \cdot \Delta t \text{ кал/сек,}$$

где  $\Delta t$  – разность температур воды, замеренных до и после опускания в нее нагретого образца.

Теоретический расчет параметров роспуска выполняется с использованием действительной эффективной мощности горелок в программе «Роспуск».

Принципиальная блок-схема программы «Роспуск» приведена на рис. 5. Программа имеет два основных цикла, внешний цикл выполняется по профилям от I до NK, а внутренний

по типам горелок от I до NG. В подпрограмме «TAVR» определяются геометрические характеристики получаемых тавров. В зависимости от толщины стенки двутавра и характеристик горелок в подпрограмме «ТМАК» находятся аппроксимирующие функции границ поля максимальных температур. Подпрограмма «SKOR» определяет скорость роспуска IVC и формирует исходные данные для расчета и уравнивания эпюры внутренних напряжений в подпрограмме «RAV». В подпрограмме

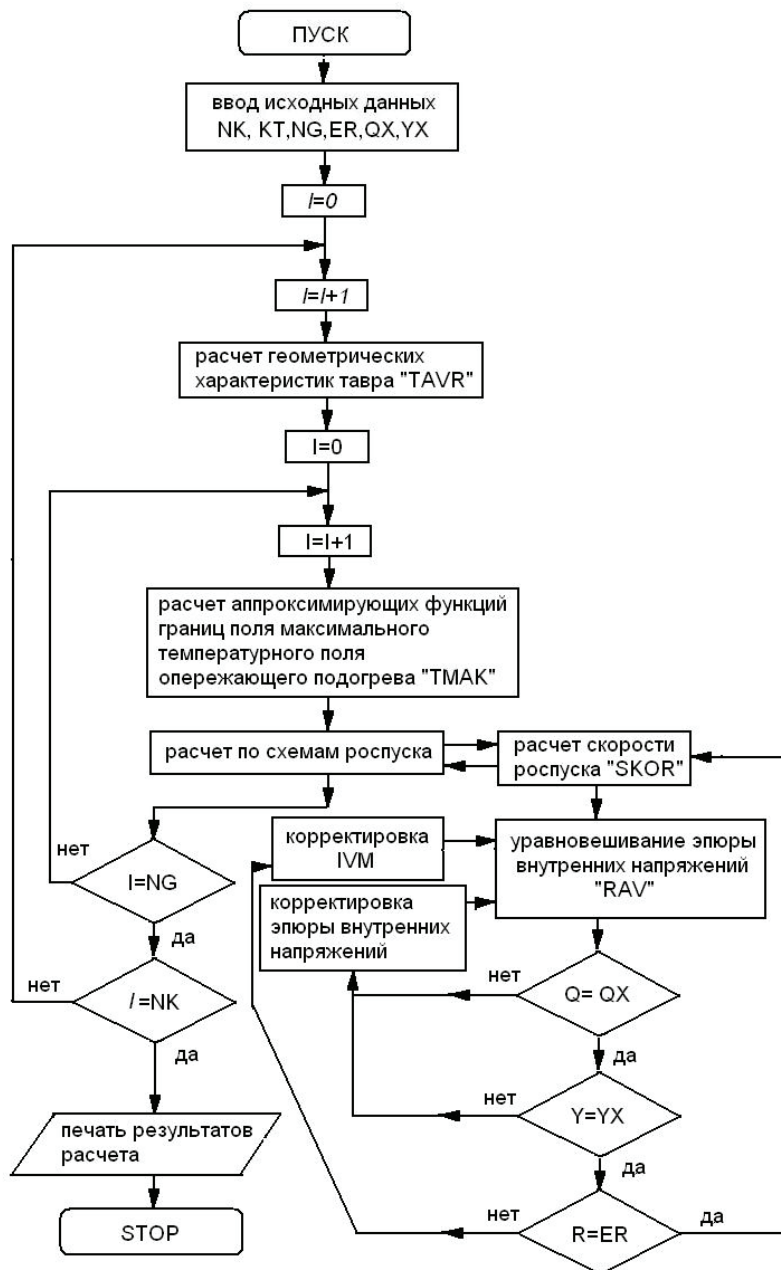


Рисунок 5. Принципиальная блок-схема программы «Роспуск».

«RAV» заложены схемы внутренних напряжений в таврах, которые могут быть получены при роспуске. Равновесие эпюры внутренних напряжений проверяется по допустимой сходимости продольной силы  $QX$  и изгибающего момента  $YX$ . При превышении в отдельных точках внутренних напряжений предела текучести производится проверка кривизны получаемых тавров по действительному значению объема пластических деформаций и при необходимости корректируется скорость роспуска. После полного выполнения внешнего цикла по профилям выводятся окончательные результаты режимов роспуска двутавров и значений внутренних напряжений в таврах.

Для расчета в программу вводились следующие данные: геометрические размеры исходного профиля, характеристики стали, эффективные мощности подогревающих горелок.

Расчет в программе «Роспуск» выполнялся по 2-м схемам: с одной (рис. 6) и с двумя (рис. 7) подогревающими горелками.

По данным схемам вычислялись: скорости движения горелок для каждой из указанных схем, расстояние между горелками «А» по схеме № 2, а также внутренние напряжения в характерных точках, полученных в процессе резки тавров. Допустимый выгиб балок принимался 10 мм.

В результате расчета к схеме № 1 были определены следующие характеристики:

- для горелки  $Q = 1680$  ккал/с –  $v = 120$  см/мин, прогиб  $f = 7,435$  мм;
- по 2-й схеме: для  $Q = 980$  ккал/с –  $v = 75$  см/мин,  $A = 7$  см,  $f = -9,455$  мм;

где  $Q$  – эффективная мощность горелок,  
 $v$  – скорость движения горелки,

$A$  – расстояние между горелками для схемы № 2,

$f$  – расчетный прогиб.

Для каждого из прокатных двутавров длиной 11,2 м подогрев стенки выполнялся только по одной из двух схем.

Бездеформационный роспуск прокатного профиля выполнялся следующим образом:

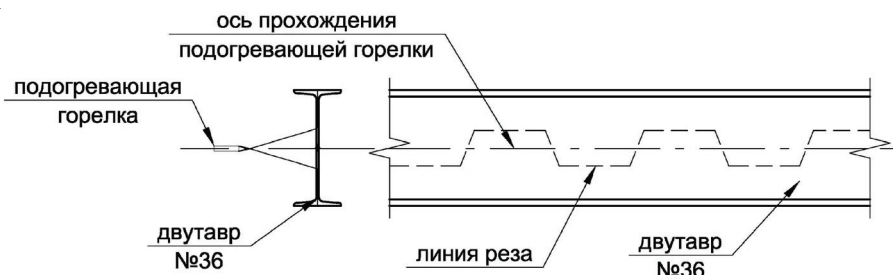


Рисунок 6. Схема № 1 – Предварительный подогрев стенки двутавра одной горелкой.

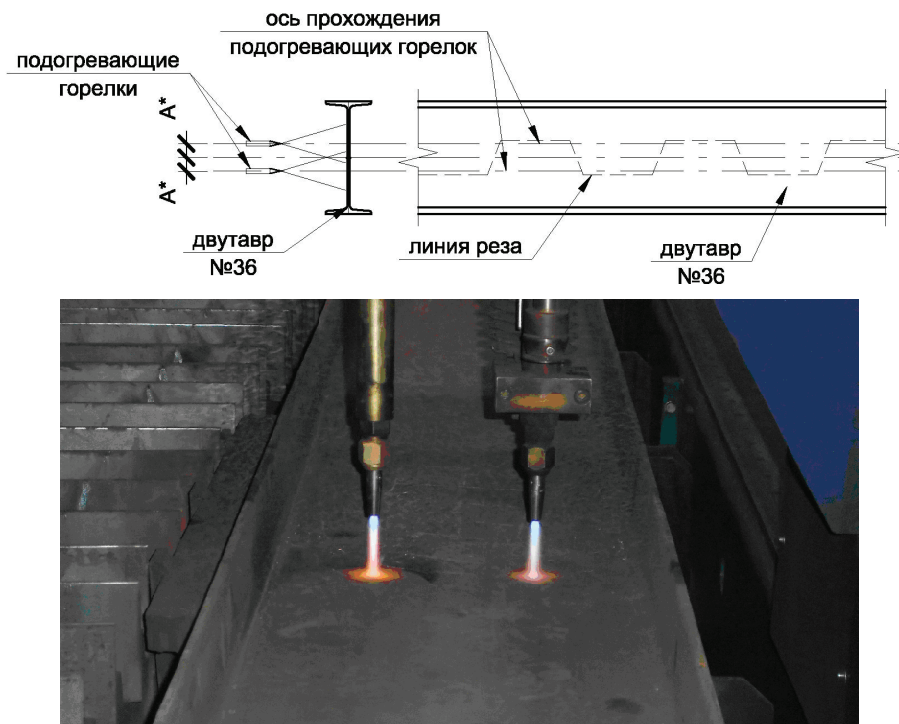


Рисунок 7. Схема № 2 – Предварительный подогрев стенки двутавра двумя горелками.

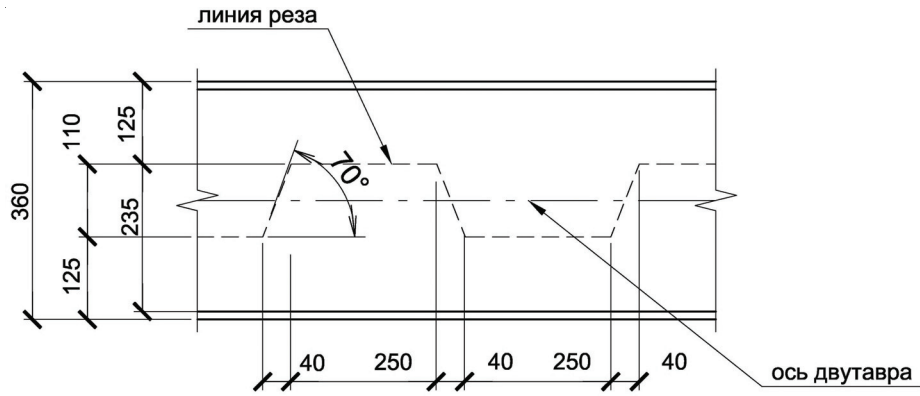
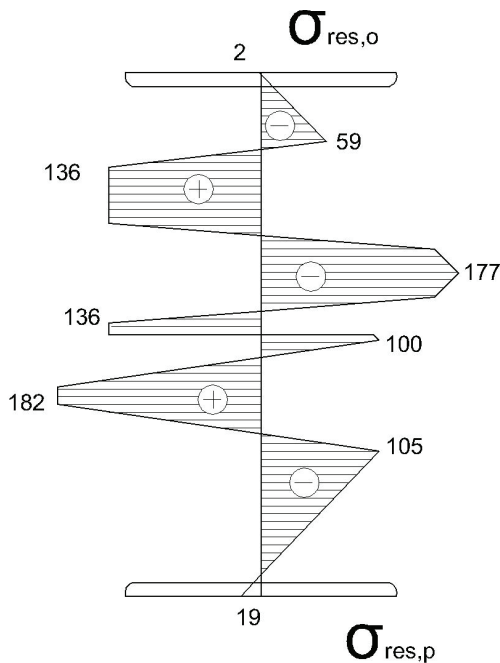


Рисунок 8. Параметры реза исходных профилей.



1. Измерили эффективную мощность горелок и откорректировали эффективную мощность для предварительного прогрева для 1-й и 2-й схемы роспуска.
2. По программе «Роспуск» определили режимы роспуска по схемам 1 и 2.
3. Прогрели стенки балок одной горелкой с  $Q = 1\,680$  ккал/с и скоростью движения горелки  $v = 125$  см/мин и двумя горелками горелками  $Q_{1,2} = 980$  ккал/с,  $v = 75,8$  см/мин,  $A = 7$  см.



**Рисунок 9.** Теоретическая эпюра внутренних напряжений (МПа) экспериментальных перфорированных балках после их изготовления.

4. По заданным параметрам реза произвели роспуск прокатных балок.

После охлаждения прогибы тавров длиной 11,2 м в плоскости стенки составили  $4 \div 9$  мм (рис. 8).

Далее выполнялась резка тавров и сборка конструкции экспериментальных перфорированных балок.

В результате теоретического расчета была получена эпюра внутренних напряжений в балке после изготовления (рис. 9). В данной эпюре учтены внутренние напряжения, возникающие в процессе роспуска и последующей сварки двух половин в простенках.

Конструкции экспериментальных перфорированных балок собирались таким образом, чтобы при сборке тавр верхнего пояса был изготовлен по 2-й схеме, а нижнего пояса по 1-й схеме.

## Выводы

В результате проведенного эксперимента по изготовлению балки можно сделать следующие выводы:

- разработан и опробован бездеформационный роспуск горячекатаных двутавров на тавры для перфорированных балок. Данный метод дает возможность получать гарантированные эпюры внутренних напряжений в таврах;
- регулирование внутренних напряжений в конструкции позволит повысить предел критической нагрузки на конструкцию.

## Литература

1. Васылев, В. Н. Стропильные фермы с поясами из широкополочных тавров, получаемых бездеформационным роспуском двутавров [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. : 05.23.01 «Металлические конструкции» / Васылев Владимир Николаевич ; МИСИ. – Макеевка, 1989. – 174 с.
2. Голоднов, А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках [Текст] / А. И. Голоднов. – К. : Изд-во «Сталь», 2008. – 150 с.
3. Голоднов, А. И. О необходимости учета остаточных напряжений при проектировании металлических конструкций [Текст] / А. И. Голоднов // Метал. конструкции: взгляд в прошлое и будущее :

## References

1. Vasylev, V. N. Erection truss with girth from broad-flanged structural tees, received by strain-free repulping of structural tees: PhD Dissertation: 05.23.01 «Metal constructions». Makiiivka, 1989. 174 p. (in Russian)
2. Golodnov, A. I. Regulation of residual voltage in welded H-beams and columns. Kyiv: Steel, 2008. 150 p. (in Russian)
3. Golodnov, A. I. About necessity of accounting of residual voltage under metal construction design. In: *Metal constructions: flashback and prospectives: Book of reports. The VIII Ukrainian scientific and technical conference. Part I.* Kyiv: Steel, 2004, p. 314–323. (in Russian)

- Сб. докл. VIII Украинской науч.-техн. конф. Ч. 1 / УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского. – К. : Изд-во «Сталь», 2004. – С. 314–323.
4. Голоднов, А. И. Распределение остаточных напряжений в сечениях прокатных уголков при предварительном напряжении локальными термическими воздействиями [Текст] / А. И. Голоднов, С. В. Козлов // Вісн. Придніпр. держ. академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ : ПДАБтаА, 2003. – № 10–11. – С. 37–41.
  5. Указания по методам правки элементов сварных мостовых конструкций ЦНИИС Минтрансстрой [Текст] / Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства. – М. : ЦНИИС, 1973. – 176 с.
  6. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин, под ред. Е. Е. Ерохина. – М. : Mashgiz, 1951. – 291 с.
  7. Няшин, Ю. И. Исследование способов снижения остаточных напряжений в горячекатаных профилях [Текст] / Ю. И. Няшин // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1980. – № 10. – С. 112–114.
  8. Трусов, П. В. Остаточные напряжения в горячекатаных двутавровых балках [Текст] / П. В. Трусов, Н. Ф. Грицук // Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. – 1978. – № 11. – С. 81–84.
  9. Патон, Б. Е. Плазменные технологии на рубеже веков [Текст] / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 3–5.
  10. Huber, A. W. Residual stress and the compressive strength of steel [Текст] / A. W. Huber, L. S. Beedle // Welding J. – 1954. – Vol. 33, No. 12. – P. 589–614.
  4. Golodnov, A. I.; Kozlov, S. V. Dispensing of residual voltage in the cutting of standard sections under prestress by topical thermal action. In: *News. Dnieper State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2003, Number 10–11, p. 37–41. (in Russian)
  5. Guidelines for the method of trueing of unit of welded bridge conduits. CSRI Mintransstroy. Moscow: TsNIIS, 1973. 176 p. (in Russian)
  6. Rykalin, N. N. Edited by E. E. Erohin. Analysis of thermal process under welding. Moscow: Mashgiz, 1951. 291 p. (in Russian)
  7. Niashin, Yu. I. Researches of process of residual voltage degradation in hot-rolled cutouts. In: *News Series Mechine building*, 1980, Number 10, p. 112–114. (in Russian)
  8. Trusov, P. V.; Gritsuk, N. F. Residual voltage in hot-rolled H-beams. In: *News. Series. Ferrous metallurgy*, 1978, Number 11, p. 81–84. (in Russian)
  9. Paton, B. E. Plasma technology. At the turn of the century. In: *Automatic welding*, 2000, Number 12, p. 3–5. (in Russian)
  10. Huber, A. W.; Beedle, L. S. Residual stress and the compressive strength of steel. In: *Welding J.*, 1954, Vol. 33, No. 12, p. 589–614.

**Василев Володимир Миколайович** – к. т. н., доцент; професор кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи металевих конструкцій.

**Дозоренко Юлія Ігорівна** – аспірант кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи металевих конструкцій.

**Васылев Владимир Николаевич** – к. т. н., доцент; профессор кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение действительной работы металлических конструкций.

**Дозоренко Юлия Игоревна** – аспирант кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение действительной работы металлических конструкций.

**Volodymyr Vasylev** – PhD (Eng.), Associate Professor; Metal Constructions Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: include the study of the actual work of metal structures.

**Yulia Dozorenko** – graduate student of Metal Constructions Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: the study of the real work of metal structures.