

DOI 10.32820/2079-1747-2018-22-129-134

УДК 621.92

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОНОРЕЛЬСОВОГО ПУТИ УСИЛЕННОГО ПРИВАРКОЙ ПОЛОСЫ

©Резниченко Н.К. Дереза К.А.

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### Інформація про авторів:

**Резниченко Микола Кирилович:** ORCID: 0000-0002-6989-0270; [rezlynik@ukr.net](mailto:rezlynik@ukr.net); доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

**Дереза Кирило Олексійович:** ORCID: 0000-0001-7965-8371; [scirill@gmail.com](mailto:scirill@gmail.com); студент факультету Комп'ютерних і інтегрованих технологій в виробництві та освіті; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглянута актуальна проблема, що має народногосподарське значення – це ефективне використання стандартного прокатного профілю, а саме таврового і двотаврового перетину, як монорейкових шляхів підвісних кранів і конвеєрів. Дана оцінка напруженого стану монорельса при вертикальному і поперечному навантаженнях.

Виконано аналіз і досліджена робота напруженого стану монорельса посиленого приварюванням смуги. Розглянуто способи посилення приварюванням поперечних або поздовжніх кромочних полос і показана недоцільність таких рішень.

Дано аналіз і отримано розрахункові залежності для оцінки іздових полиць двотавру за допомогою привареної смуги раціональної товщини. Результати теоретичних досліджень підтверджені експериментально.

**Ключові слова:** двутавр, балка, напружений стан, приварка; смуга, посилення; дослідження, профіль, монорейки.

*Резниченко Н.К. Дереза К.А. «Исследование работы монорельсового пути усиленного приваркой полосы»*

В статье рассмотрена актуальная проблема, которая имеет народнохозяйственное значение – это эффективное использование стандартного прокатного профиля, а именно таврового и двутаврового сечения, в качестве монорельсовых путей подвесных кранов и конвейеров. Дана оценка напряженного состояния монорельса при вертикальной и поперечной нагрузках.

Выполнен анализ и исследована работа напряженного состояния монорельса усиленного приваркой полосы. Рассмотрено способы усиления приваркой поперечных или продольных кромочных полос и показана целесообразность таких решений.

Дан анализ и получены расчётные зависимости для оценки ездовых полок двутавра с помощью приваренной полосы рациональной толщины. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментально.

**Ключевые слова:** двутавр, балка, напряженное состояние; приварка; полоса, усиление; исследование, профиль, монорельса.

*Reznichenko N. Dereza K.* «Analysis of the work of the monorail in the stressed state, reinforced by the welding strip».

The article considers the actual problem of national economic importance — it is an effective use of a standard rolling profile, namely, T-shaped and I-beam sections, as monorail tracks of overhead cranes and conveyors. An assessment of the stress state of monorail with vertical and transverse loads is given.

Performed analysis of the work of the monorail in the stressed state, reinforced by the welding strip. The ways of welding of transverse or longitudinal edge strips of I-beam by welding are considered and the expediency of such solutions is shown.

The analysis is given and the calculated dependencies are obtained on riding shelf with welded strip of rational thickness. The results of theoretical studies are confirmed experimentally.

**Keywords:** I-beam, beam, stress state, welding, band, gain; study, profile, monorail.

## 1. Введение

Балки двутаврового профиля широко применяются в строительстве, являясь элементами мостов, цеховых конструкций, промышленных и гражданских зданий. Преимуществом профиля в данном случае является эффективная работа на изгиб в плоскости большой жесткости, хорошо работают двутавры и на продольный изгиб. Другая область применения двутавров – пути подвешенного транспорта, речь идет о путях перемещения электроталей, подвешенных кранов, тележек подвешенных конвейеров, в ряде случаев двутавры являются элементами кранбалок, поясами пролетных балок козловых кранов и т.д. В этом случае имеет место работа полок двутавра на изгиб под нагрузками, передаваемыми колесами грузовых тележек. Во многих случаях двутавр работает одновременно и как элемент несущей конструкции, например, ригель козлового крана, и как ездая балка, воспринимающая подвижные нагрузки.

Использование стандартного проката в качестве путей передвижения ставит вопрос об усилении несущей способности монорельсового пути.

## 2. Анализ литературных источников

Подвесные монорельсовые пути являлись объектом исследования многих специалистов – П.Ф.Папковича, Мак-Грегора, Т.И.Джарамилло, С.П.Тимошенко, В.И.Макрушина, Б.М.Розеншейна, Н.П. Флейшмана, Ю.Г.Розенталя, Б.С.Ковальского, А.М.Шуна, G.Mendel, P.Heile, H.O.Hannovera и др.

Отметим, что одно из первых решений задачи, опирающееся на основные положения теории упругости было дано П.Ф.Папковичем. Рассмотрев изгиб длинной консольной пластинки, автор рассматривает изгиб двутавра, и не учитывает при этом деформацию стенки.

Близкие результаты получены также и другими авторами. Теоретические решения рассматриваемой задачи получили убедительную апробацию в экспериментах Б.М.Розеншейна, охвативших также двутавры усиленные приваркой полосы.

Случай несимметричного нагружения (нагрузка одной полки) весьма полно рассмотрен Ю.Г.Розенталем, - исследовалась модель из вертикальной стенки и двух полуполок, сопрягаемых по оси, предполагаемой недеформируемой.

Решение без указанного допущения получено Б.С.Ковальским и А.М.Щуном, ими же дано решение для полки переменной толщины.

## **2. Цель и задачи исследования**

Исследовать и оценить напряженное состояния монорельса, усиленного приваркой полосы и предложить метод расчета в балке.

## **3. Изложение основного материала**

Расчет двутавра складывается из оценки напряжений общего изгиба в вертикальной и горизонтальной плоскостях, и определения напряжений в ездовой полке, что представляет некоторую сложность, т.к. необходима учесть влияние высоты и толщины стенки, радиуса сопряжения полки со стенкой, переменной толщины самой полки, а также зоны распространения напряжений от вертикальной нагрузки, и места приложения последней.

При нагружении полки двутавра колесами грузовых тележек грузоподъемностью свыше 80...100 кН даже специальные двутавры по ГОСТ 19425-77, не удовлетворяют прочностным требованиям, и тогда прибегают к усилению, чаще всего путем приварки полосы к ездовой полке.

Способы усиления (приварка поперечных или продольных кромочных полос) не нашли широкого распространения из – за низкой технологичности и сильного коробления двутавра от сварочных швов, поэтому самым простым и технологичным способом является приварка сплошной полосы.

Предполагают, что сварные швы обеспечивают совместную работу полки и полосы, как балки цельного сечения.

На самом деле картина напряженного состояния более сложна.

В работе приводится более убедительное решение, исключая отмеченную ошибку. Полка двутавра деформируется под воздействием давления колеса  $P$ , и сил в сварном шве, - момента  $M_0$ , и поперечного усилия, сжимающего (или растягивающего) полку. При малых длинах элементов расчет деформаций сложен, и решение задач лежит, по нашему мнению, в плоскости эксперимента. Приближенные же решения могут быть получены. Например, можно допустить, что сечение шва является жестким и углы поворота концов полки и полосы равны (рис.1)  $\varphi_1(P, M_0) = \varphi_2(M_0)$  – так обычно поступают в расчетах неопределимых систем, в расчетах влияния жесткости элементов на их деформации, в фермах и других конструкциях. В этом случае имеем

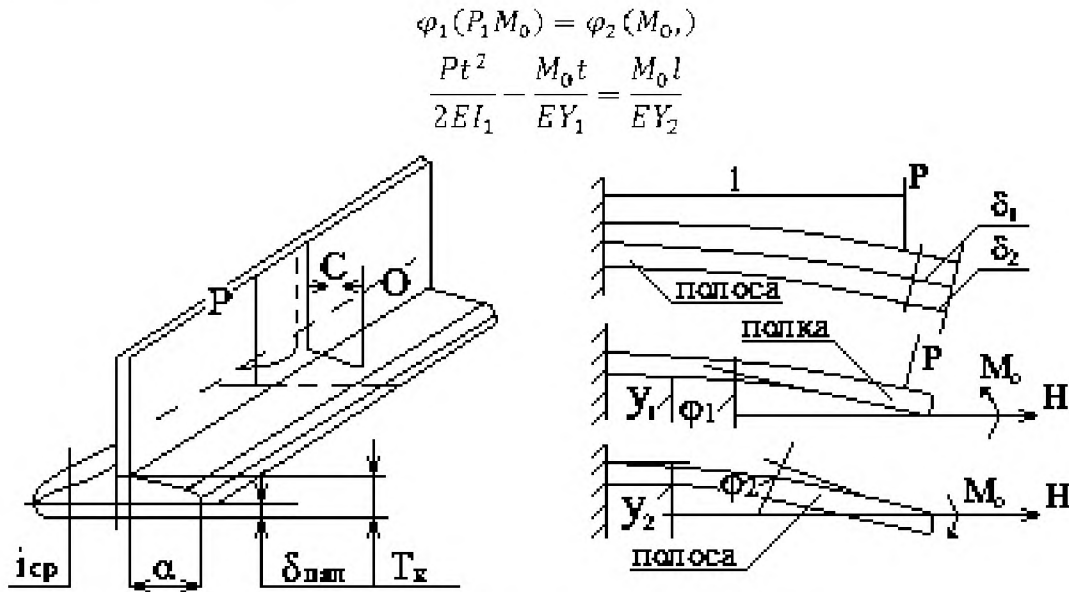


Рис.1 – Расчетная схема усиленного двутавра

$$\varphi_1(P_1 M_0) = \varphi_2(M_0)$$

$$\frac{Pt^2}{2EI_1} - \frac{M_0 t}{EY_1} = \frac{M_0 l}{EY_2}$$

и момент в полке у стенки

$$M_n = Pl - M_0 - \theta Pl$$

откуда

$$\theta = 1 - \frac{1}{2(1 + b_1^2/b_2^2)}$$

В общем случае  $0 < b_2 < \infty$ , имеем  $1 > \theta > 0,5$ , т.е. при любой толщине листа мы можем уменьшить момент в полке не более чем вдвое например, при

$$b_2/b_1 = 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4. \theta = 0,75; 0,61; 0,55; 0,53; 0,52; 0,51$$

Расчеты справедливы когда между полки двутавра и полосой возникает "щель".

Прогиб полки от нагрузки P и момента  $M_0$

$$y_1(x) = \frac{P}{6EY_1} (3l^2x - x^3) - \frac{M_0}{2EY_1} (21x - x^2),$$

и полосы  $M_0$

$$y_2(x) = \frac{M_0}{2EY_2} (21x - x^2).$$

Следует выяснить, имеет ли место неравенство  $y_1(x) > y_2(x)$  при  $0 < x < l$

$$\frac{P}{6EY_1} (3l^2x - x^3) > \frac{M_0}{2} \left( \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} \right) (21x - x^2)$$

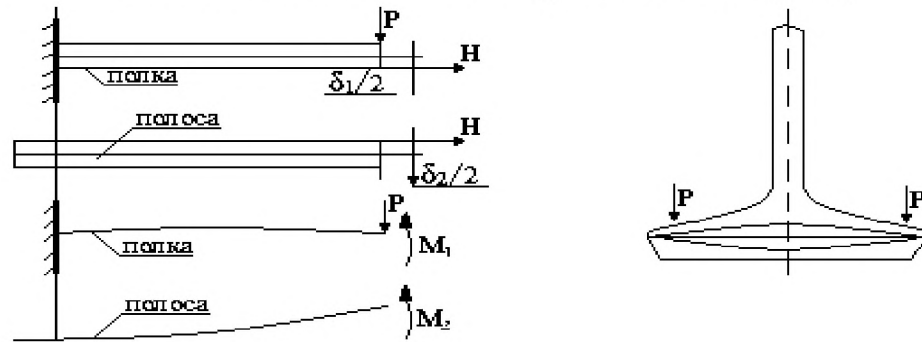
После подстановки  $M_0$  и преобразований получаем  $x < \frac{3}{2}l$ , следовательно

$y_1(x) > y_2(x)$ , между полкой и полосой образуется "щель".



Можно дать и другую оценку, допуская возникновение усилия, растягивающего полку и сжимающего лист.

Для консольной балки постоянного сечения, нагруженной силой (рис.2).



**Рис.2** – Образование щели между балкой и полосой

$$y(x) = (P/EI)(lx_2/2 - x^3/6),$$

$$y(x) = (M/EI)x^2/2,$$

$$y'(x) = (P/EI)(lx - x^2/2),$$

$$y'(x) = (M/EI)x,$$

$$y(l) = Pl^3/3EI,$$

$$y(l) = Ml^2/EI^2.$$

$$y'(l) = Pl^2/2EI.$$

$$y'(l) = Ml/EI,$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \int_0^l [y'(x)]^2 dx = \frac{P^2 l^5}{15(EI)^2}$$

$$\Delta M = M^3 l^3 / 6(EI)^2.$$

При совместном воздействии P и M,

$$y'(x) = (P/EI)(lx - x^2/2) - (M/EI)x,$$

$$\Delta pM = \frac{1}{2} [(P/EI)(lx - x^2/2) - (M/EI)x]^2 dx = \frac{P^2 l^5}{15(EI)^2} - \frac{5MP l^4}{24(EI)^2} + \frac{M^2 l^3}{6(EI)^2}.$$

Используя вышеизложенное, при условии  $\Delta_1 = \Delta_2$  вместо  $y_1' = y_2'$ , и сделав преобразования получим

$$\psi = \frac{0,632}{\sqrt{1 + 6_1^6 / 6_2^6}}$$

Полагая, что вместо  $M_0$  на полку и полосу действуют моменты

$M_1 = -H\delta_1/2$  и  $M_2 = -H\delta_2/2$ , названные силами H, и используя предыдущее выражения

$$\frac{P^2 l^5}{15(EI_1)^2} - \frac{5(H\delta_1/2)Pl^4}{24(EI_1)^2} + \frac{(H\delta_1/2)^2 l^3}{6(EI_1)^2} - \frac{(H\delta_2/2)^2 l^3}{6(EI_2)^2},$$

и подставив  $\frac{H\delta_1}{2} = \psi Pl$ , откуда

$$\psi = \frac{5}{8} \frac{1}{1 - 6_1^4 / 6_2^4} - \sqrt{\frac{25}{64} * \frac{1}{(1 - 6_1^4 / 6_2^4)^2} - \frac{2}{5} \frac{1}{6_1^4 / 6_2^4}}$$

приняв место  $\Delta p_M = \Delta p + \Delta M$

$$\psi = \frac{0,632}{\sqrt{1 + \sigma_1^4 / \sigma_2^4}}$$

При  $b_2/b_1 = 0; 1; \infty$  значение  $\psi$  по выражениям совпадают, при других значениях имеем очень малое отличие.

Очень важно, что различие схемы внутренних усилий, допуская упрощение граничных условий, приводят к близким результатам, и очевидно, что применение толстых листов для усиления полки не имеет смысла.

Для проверки полученных зависимостей проведены эксперименты на натуральных образцах, включающих сварной короткий двутавр с полками постоянной толщины, катаный короткий и длинный ( $l = 2000$  мм) двутавры с переменной толщиной полок. К полкам двутавров, электродуговой сваркой были приварены полосы толщиной  $b_{\text{полосы}} = b_{\text{полки}}$  и  $b_{\text{полосы}} = 0,5 b_{\text{полки}}$ . Деформации измерялись проволочными тензодатчиками типа 2ПКБ – 5 – 100Б с базой 5 мм, наклеенными на полке у галтели. Нагружение полок производилось при помощи специальных скоб на нагрузочной машине ГРМ – 1.

Нагрузка принималась: для сварного двутавра - '2Р = 1,96; 3,92; 5,88 кН, для катаных двутавров – 2Р = 2,45; 4,9; 7,5 кН. Нагрузки прилагались на расстояниях от стенки 0,6...0,85 ширины полки.

### Выводы

Результаты эксперимента отличаются малым разбросом (7...15%), и убедительно подтверждают возможность, упрощенного подхода в оценках напряжений в полке двутавра. С этой точки зрения пригодна любая из расчетных схем, однако характер деформаций полки и полосы говорит, что между полкой и полосой должна образоваться "щель". Действительно, такая "щель" легко обнаруживается, особенно при больших нагрузках, как показано на рис.2.

### Список використаних джерел:

1. Нечипоренко Л. Г. К расчету полки ездового двутавра / Л. Г. Нечипоренко, Н. К. Резниченко // *Подъемно-транспортное оборудование* : научн.-техн. сб. – 1983. – Вып. 14. – С. 13-15.
2. Науменко В.К. К исследованию напряженно-деформативного состояния монорельса / В.К. Науменко, Н.К. Резниченко. – Киев : Укр. НИИТИ, 1987. – Деп. 1232-Ук 87. – 34 с.
3. Резниченко Н. К. Работа двутавра при переменной нагрузке / Н. К. Резниченко // *Подъемно-транспортное оборудование*: научн.-техн. сб. – 1987. – Вып. 18. – С. 48-49.
4. Ковальский Б. С. Усиление полок ездовых двутавров приваркой полосы / Б. С. Ковальский, Н. К. Резниченко // *Подъемно-транспортное оборудование* : научн.-техн. сб. – 1990. – Вып. 21. – С. 21-23.

### References

1. Nechiporenko, LG & Reznichenko, NK 1983, 'K raschetu polki ezdovogo dvutavra', *Podemno-transportnoe oborudovanie*, iss. 14, pp. 13-15.
2. Naumenko, VK & Reznichenko, NK 1987, *K issledovaniju naprjazhenno-defformativnogo sostojanija monorelsa*, *Ukrainskij nauchno-issledovatel'skij institut nauchno-tehnicheskoy informacii*, Kiev.
3. Reznichenko, NK 1987, 'Rabota dvutavra pri peremennoj nagruzke', *Podemno-transportnoe oborudovanie*, iss. 18, pp. 48-49.
4. Kovalskij, BS & Reznichenko, NK 1990, 'Usilenie polok ezdovyh dvutavrov privarkoj polosy', *Podemno-transportnoe oborudovanie*, iss. 21, pp. 21-23.

Стаття надійшла до редакції 7 грудня 2018 р.