

**Определение размеров двутавровых балок с численным моделированием локальных напряжений во фланцах, поддерживающих колеса**

Д. Gaška\*, Т. Haniszewski\*\*, Ж. Margielewicz\*\*\*

\* Силезский технологический университет, Красиньское 8,40-019 Катовице, Польша, E-mail: damian.gaska@polsl.pl

\*\* Силезский технологический университет, Красиньское 8,40-019 Катовице, Польша, E-mail: tomasz.haniszewski@polsl.pl

\*\*\* Силезский технологический университет, Красиньское 8,40-019 Катовице, Польша, E-mail: jerzy.margielewicz@polsl.pl

<http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.23.3.14083>

## 1. Введение

В различных промышленных транспортных системах для перемещения грузов используются легкие краны или переносные подъемники со стационарными гусеницами. Эти устройства требуют специальных несущих конструкций в виде дорог, в основном двутавровых балок, характерной особенностью которых является локальная нагрузка на нижний фланец балочного сечения-силы, поступающие от колес крана или подъемной тележки. Поэтому в процессе проектирования несущей конструкции для подъемного или мостового крана следует учитывать дополнительные составляющие напряжений от локального изгиба свободных участков поперечного сечения двутавровой балки или коробчатой балки.

Применены однобалочные автодороги [1-5]:

- в кранах грузоподъемностью <25 т и пролетом <25 м;
- \* в надземных транспортерах (одиночных и двойных);
- \* на приостановленных горных железных дорогах.

Краны, в которых имеется балка в виде двутавровой балки, широко используются в промышленности из-за их небольшого размера, веса и последующей цены. Прогон я-луча использован как как как проезжая часть ворота для двигать рельс установленный на луче, так и как ый подъем на более низком фланце. Несмотря на легкость конструкции, однако, по сравнению с боксгардерами, они характеризуются большей стройностью и поэтому не подходят для мостовых кранов с большими пролетами и полезными нагрузками [6-16]. Поэтому типичная область применения этого типа мостового крана обычно ограничивается полезной нагрузкой <12,5 т (хотя есть и Тали грузоподъемностью 25 т) и пролетом <25 м, с низкой скоростью работы и интенсивностью работы [1, 2]. Однако таких параметров достаточно:

- в эпоху высокой производительности с желанием снизить затраты;
- для режимов которые могли соответствовать большинству процессов производства и регулировать в промышленных заводах.

Конструктивное решение, чаще всего применяемое в настоящее время, заключается в использовании нижних полочных конструкций в двутавровой балке в качестве дороги для подъема (что практически обязательно в случае кранов с одной балкой). Другое возможное решение использовать верхнюю плоскость, с рельсом установленным как проезжая часть для ворота. Это предпочитаемое разрешение для более больших нагрузок, но оно требующий много времени и дорог произвести. Часто прогоны изготавливаются из обычной горячекатаной балки с уклоном внутренних граней полок, вдоль которых конические или сферические колеса с фланцем или без фланца рулонов (фиг. 1, а). Имеются также двутавровые балки в виде балки с параллельным фланцем, вдоль которой катится роликное колесо верхнего подъемного механизма (фиг. 1, б). Нижние фланцы, в

зависимости от анализа усилия прогона, должен иметь немножко большую толщину должную к:

- \* относительно более высокое напряжение на свободной кромке фланцев;
- \* возникновение дополнительных контактных напряжений в момент прохождения подъемных колес;
- \* абразивный-адгезионный износ верхней поверхности нижних фланцевых пластин от контакта с подъемными колесами.

Соответственно, введена специальная сварная балочная конструкция двутавровой балки, состоящая из двух различных Тбар (рис. 1, с). Нижняя Т-образная балка имеет более толстые полки, с цилиндрическими подрезами при переходе веб-пластин. Подрезать радиуса ослабит соответствуя зазубрину, и будет иметь благотворное влияние на прочности усталости и стойкости прогона. Дополнительно, твердея поверхность полки можно также использовать для улучшать долговечность, тем самым снижая износ из-за контакта с колесами [2].

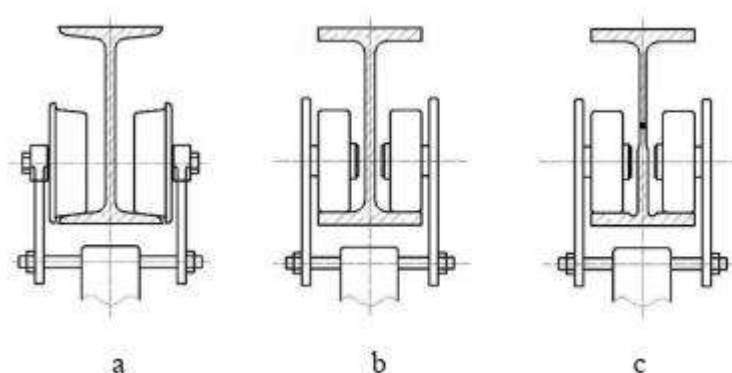


Fig. 1 сечения главной балки в грузоподъемных кранах :а - из двутавровых балок в соответствии с PN-АН 10024:1998; б - параллельно-фланец балки в соответствии с PN-АН 10034:1996; с - сварной конструкции из двух Т-образных пластин, в соответствии с PN-АН 10055:1999

## 2. Компоненты напряженного состояния от локальной нагрузки от давления колеса

При расчете прочности балок для навесного транспортного оборудования необходимо также учитывать особую работу локально нагруженных нижних фланцев балки. Кроме общего основного напряжения изгиба, действующего в направлении X (рис. 2, а), также появляется локальное отклонение фланцев. Затем на нижних фланцах будет по крайней мере двухосное напряженное состояние (рис. 2, Б) из-за появления дополнительных напряжений в направлении у. Согласно [17-19], когда нижний фланец армируется сварным металлическим листом аналогичной толщины по ширине и длине, то можно предположить, что напряжения, в соответствии с формулами (1-5), достаточны для проверки усилия балки. Для длинных подкреплений сваренных к нижнему фланцу

никакое специфическое наведение в стандартах для аналитически конструкции кранов.

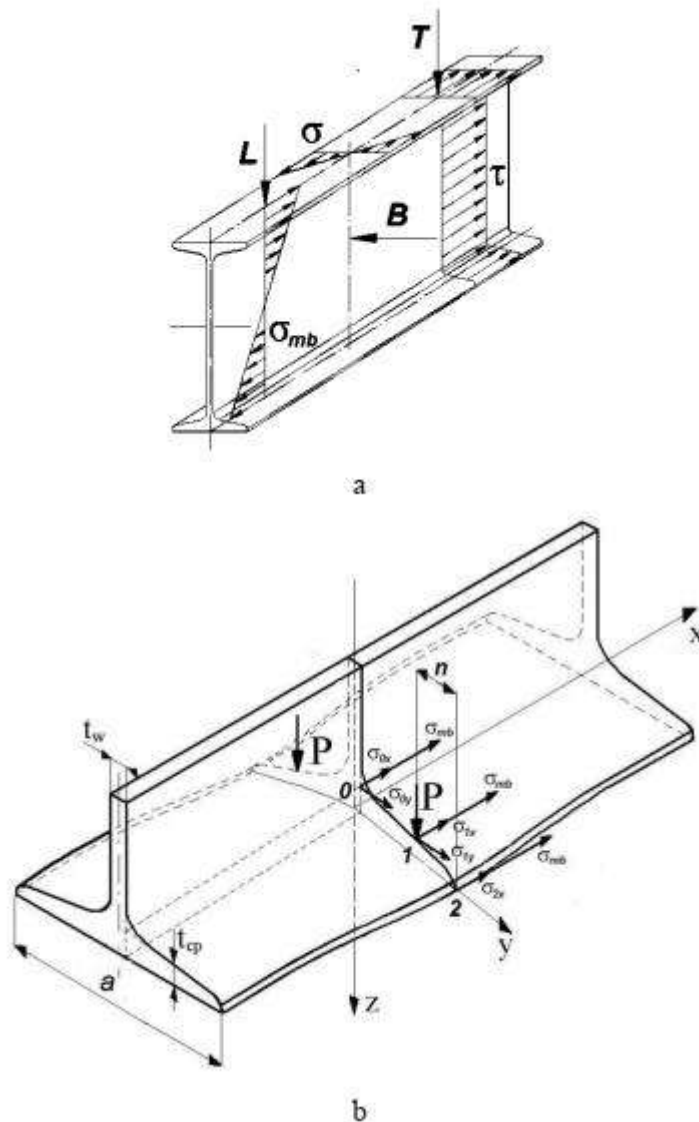


Fig. 2 Способ нагружения и компоненты напряженного состояния в двутавровой балке: а- без влияния локального изгиба Нижнего фланца; б- в случае локального изгиба Нижнего фланца  $\sigma_{0x}, \sigma_{1x}, \sigma_{2x}, \sigma_{0y}, \sigma_{1y}$  - апряжений от местного изгиба в точках 0, 1, 2.  $\sigma_{mb}$  - стресс от основной гибочной балки;  $\tau$  - напряжение сдвига;  $L$  – вертикальное изгибающее усилие;  $T$  - усилие сдвига;  $B$  - горизонтального изгибающего усилия;  $P$  - местные изгибающие силы

В модельном расчете фланцы можно рассматривать как бесконечно длинную пластину, ограниченную в точке перехода от полотна к фланцу и со свободной кромкой на конце. Для такой принятой модели наибольшее нормальное напряжение от изгиба фланца локальной изгибающей силы  $P$  (давление пары колес) возникает:

- в поперечном сечении, где происходит переход от полотна к фланцу (точка 0, фиг. 2, б) и составляет:

- в плоскости  $YZ$  в направлении оси  $y$ :

$$\sigma_{0y} = \frac{c_{0y}P}{I_{cp}^2}; \quad (1)$$

- в плоскости XZ в направлении оси x:

$$\sigma_{0x} = \frac{c_{0x}P}{I_{cp}^2}; \quad (2)$$

• в сечении, где нагрузка на колеса (точка 1, фиг. 2, b) и составляет:

- в плоскости YZ в направлении оси y:

$$\sigma_{1y} = \frac{c_{1y}P}{I_{cp}^2}; \quad (3)$$

- в плоскости XZ в направлении оси x:

$$\sigma_{1x} = \frac{c_{1x}P}{I_{cp}^2}; \quad (4)$$

• в конце фланца и составляет (пункт 2, фиг. 2, b):

- в плоскости XZ в направлении оси x:

$$\sigma_{2x} = \frac{c_{2x}P}{I_{cp}^2}; \quad (5)$$

где коэффициенты  $c_i$  рассчитываются в соответствии с таблицей 1

Table 1

Values of  $c_i$  factors [20]

	Stresses	Values of $c_i$ factors
I-beam with parallel flanges	Longitudinal bending stresses (X direction)	$c_{0x} = 0.050 - 0.580\lambda + 0.148 e^{3.015\lambda}$ $c_{1x} = 2.230 - 1.490\lambda + 1.390 e^{-18.33\lambda}$ $c_{2x} = 0.730 - 1.580\lambda + 2.910 e^{-6.00\lambda}$
	Transverse bending stresses (Y direction)	$c_{0y} = -2.110 + 1.977\lambda + 0.0076 e^{6.53\lambda}$ $c_{1y} = 10.108 - 7.408\lambda - 10.108 e^{-1.364\lambda}$
I-beam with inclined flanges	Longitudinal bending stresses (X direction)	$c_{0x} = -0.981 - 1.479\lambda + 1.120 e^{1.322\lambda}$ $c_{1x} = 1.810 - 1.150\lambda + 1.060 e^{-7.70\lambda}$ $c_{2x} = 1.990 - 2.810\lambda + 0.840 e^{-4.69\lambda}$
	Transverse bending stresses (Y direction)	$c_{0y} = -1.096 + 1.095\lambda + 0.192 e^{-6.00\lambda}$ $c_{1y} = 3.965 - 4.835\lambda - 3.965 e^{-2.675\lambda}$
$\lambda = \frac{n}{0.5(a - t_w)}$		

### 3. Общие правила проектирования главной балки подвесных кранов

По данным [21], материал балки поперечное сечение крана должно быть выбрано таким образом, что при возникновении единой расчетной нагрузки, с учетом частичных коэффициентов надежности  $\gamma_p$ , соответственно объединены в соответствии с [22], в то время как возникновение двухосного нормального напряжения ( $\sigma_x$  and  $\sigma_y$ ) касательного напряжения  $\tau$  – условие выполняется:

$$\left(\frac{\sigma_{Sd,x}}{f_{Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Sd,y}}{f_{Rd,y}}\right)^2 - \frac{\sigma_{Sd,x} \sigma_{Sd,y}}{f_{Rd,x} f_{Rd,y}} + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0, \quad (6)$$

где  $f_{Rd,x}$ ,  $f_{Rd,y}$  - соответствующие предельно допустимых значений напряжений по направлениям X и y;  $f_{Rd}$  – ограничение сдвиговых напряжений,  $\sigma_{Sd,x}$ ,  $\sigma_{Sd,y}$ ,  $\tau_{Sd}$  - являются расчетные напряжения.

При расчете напряжения необходимо учитывать все внутренние силы, возникающие в несущей системе:

- для расчета нормальных напряжений: осевая сила, изгибающий момент и бимомент;
- для расчета напряжения сдвига: силы сдвига и крутящего момента.

Для определения размеров главной балки опрокинутого крана следует учитывать дальнейшее напряжение изгиба местных фланцев по формулам (1-5). Местные усилия могут быть уменьшены одной четвертью из-за экстренной пластичной емкости фланца плиты или экстренной пластичной емкости напряжения паутины. Затем условие (6) при проверке поперечного сечения принимает вид (сравните фиг. 2):

- для точки 0 согласно рис. 2, b):

$$\left(\frac{\sigma_{mb} + 0.75 \sigma_{0x}}{f_{Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{0.75 \sigma_{0y}}{f_{Rd,y}}\right)^2 - \frac{0.75 \sigma_{0y} (0.75 \sigma_{0x} + \sigma_{mb})}{f_{Rd,x} f_{Rd,y}} + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0; \quad (7)$$

- для точки 1 согласно рис. 3, b:

$$\left(\frac{\sigma_{mb} + 0.75 \sigma_{1x}}{f_{Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{0.75 \sigma_{1y}}{f_{Rd,y}}\right)^2 - \frac{0.75 \sigma_{1y} (0.75 \sigma_{1x} + \sigma_{mb})}{f_{Rd,x} f_{Rd,y}} + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0; \quad (8)$$

- для точки 2 согласно рис. 2, b:

$$\left(\frac{\sigma_{mb} + 0.75 \sigma_{2x}}{f_{Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd}}\right)^2 \leq 1.0. \quad (9)$$

#### 4. Численная модель балки двутавровой

Проведено сравнение результатов, полученных с использованием МКЭ и аналитического метода. Она преследует несколько целей. Во-первых, в плане проверки правильности предложенного способа моделирования балки. Во-вторых, анализ влияния параметра  $n$  на полученные результаты и их точность. В численном моделировании использована балка двутаврового крана НЕВ 300 пролетом 10 м и грузоподъемностью 10 т. Пролет колес подъемной лебедки составил 0,795 м. В представленной модели были опущены конструкции загонов и другие ненужные элементы крана. Модель была загружена в середине пролета. Геометрические зависимости показаны на рис. 3. Применена система единиц N, MM, МПа, поэтому результаты напряжений в МПа и смещения показаны в мм. Несущая конструкция выполнена из S355, где предельное расчетное напряжение для листов толщиной < 63 мм составляет 305 МПа [21]. Использовались стандартизированные элементы квадратной оболочки общего назначения S8R и квадратичные кирпичные элементы общего назначения с уменьшенными точками интегрирования C3D20R из программной документации Abaqus 6.13 [23]. Модель представлена на фиг. 4 состоит из 1413688 элементов и 1641297 узлов.

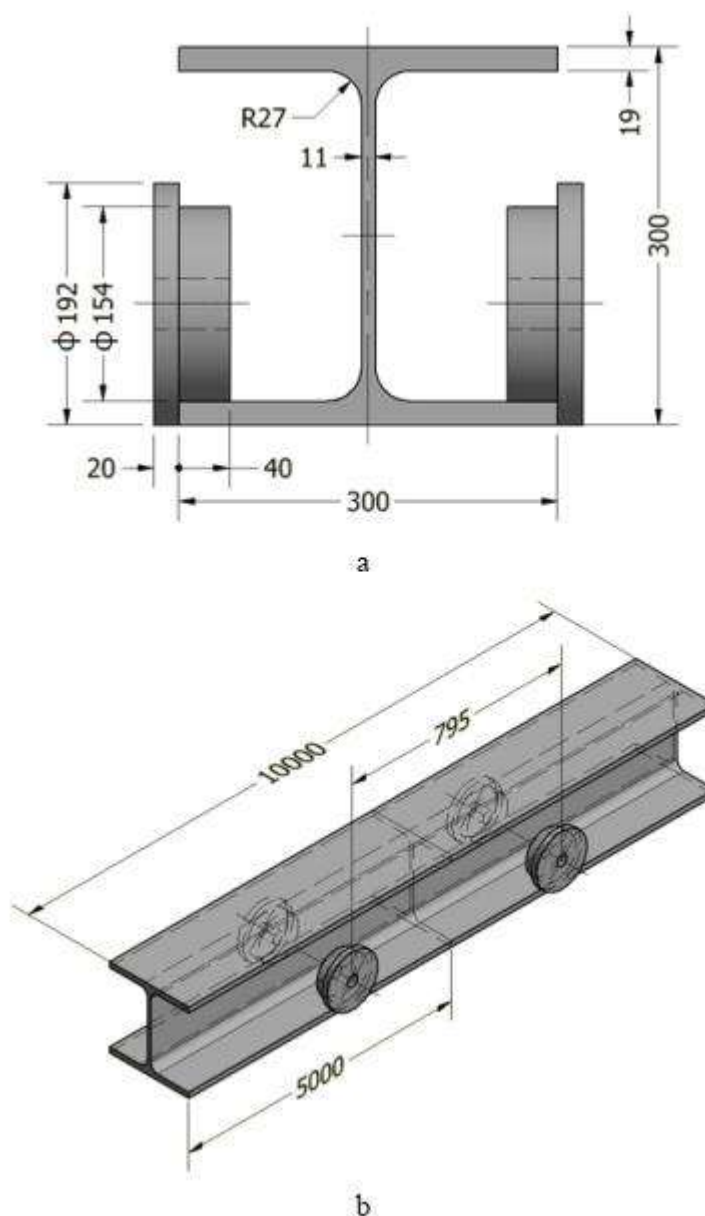


Fig. 3 модельных размера: А-общие геометрические данные прогона я-луча; б-общие геометрические данные пересекающие лебедку

Граничные условия были применены опорными точками, которые объединены с конструкцией с помощью соединителя типа балки MPC. Конструкция балки была разделена на три части - два типа поверхности и один в виде твердого тела (с целью сокращения времени расчета).

Эти части совмещены друг с другом с помощью связи shell-to-solid, которая соединяет боковую поверхность твердой модели с краем оболочки. Нагрузка была применена, добавляя сил колес оси лебедки с помощью ограничения кинематической связью. Нагрузка на нижний фланец балки была приложена с помощью контактных элементов типа "узел-поверхность". Между контактом колеса и поверхностью Нижнего фланца балки используется коэффициент трения со значением 0,15, что справедливо для соединения стали со Сталью. При моделировании также была применена гравитация в

виде значения ускорения  $9,81 \text{ м/с}^2$ , что дает возможность учитывать массу используемых элементов конструкции.

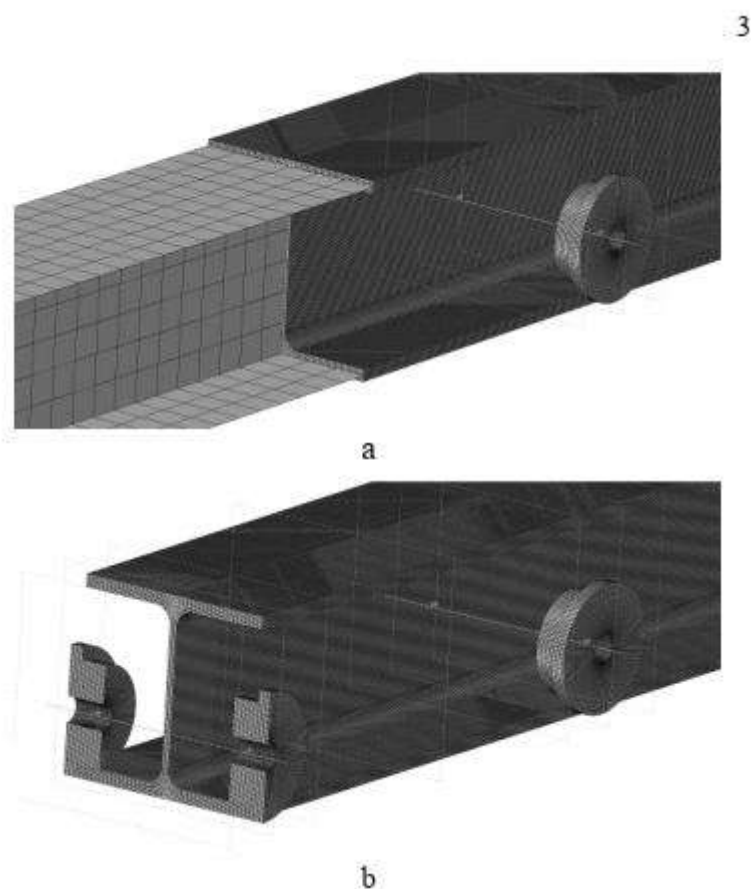


Fig. 4 Модель FEM: a-соединение между твердым телом и частями раковины I; b-твердая модель с поперечным сечением колеса

## 5. Результат моделирования

Результаты моделирования представлены в виде карт напряжений с использованием теории Хубера–Мизеса–Хенки и показаны на фиг. 5 и 6. На этих рисунках показаны карты напряжений в средней (моделируемой как твердое тело) части балки.



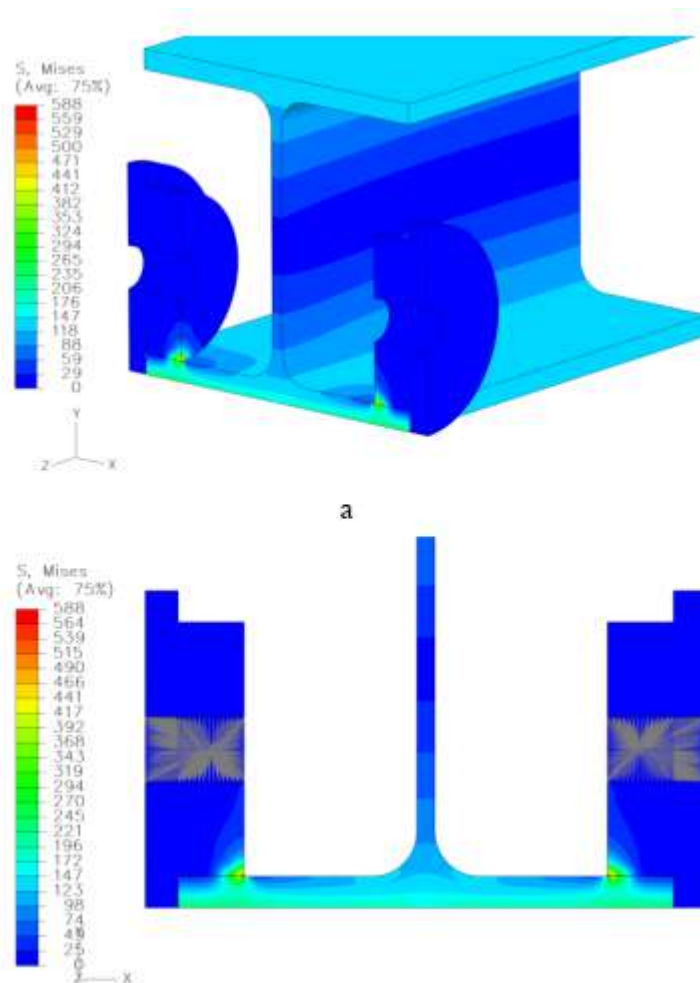


Fig. 5 Stress в двутавровой балке по теории Хубера-Мизеса-Хенки (с колесами и сеткой):  
 А-изометрический вид; b - поперечное сечение колеса

Эти делают его возможным получить значения усилия на любой этап профиля I-beam, специально на выкружках или местах куда нижний фланец идет внутрь к средней части I-beam. Инжир. На рис. 6 приведены карты напряжений в верхней и нижней частях балки, на которых видно влияние локального и основного изгиба Нижнего фланца, связанного с нагружением конструкции колесами. Максимальные значения напряжения представлены на нижнем фланце балки, в основном на соединении между колесами и верхней поверхностью Нижнего фланца балки. Карты напряжений представлены на фиг. 2 по сечению Нижнего фланца балки служат основой для определения значений напряжений в так называемых характерных точках, представленных на фиг. 2 и 7.

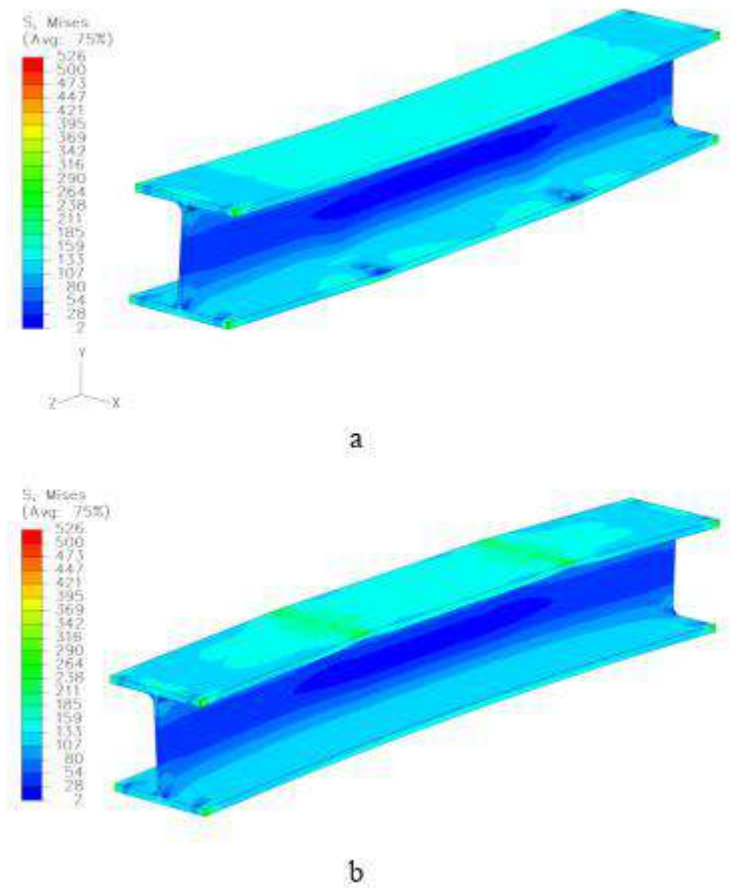


Fig. 6 Напряжение в двутавровой балке по теории Хубера-Мизеса-Хенки (без колес): а- верх; б-низ

## 6. Сравнение расчетов, полученных методом МКЭ, с аналитическими методами

Fig. 7 приведены точки измерения напряжений и сравнение значений, полученных аналитически, а также значений, полученных с помощью численных расчетов. Значения напряжений в характерных точках 0, 1, 2, представленных в нормативных документах, связаны со значением коэффициента  $n$  (который представляет собой размерность между стороной нижней поверхности фланца и местом приложения силы). Определение значения коэффициента  $n$  трудно при использовании нагрузки конструкции в качестве неконцентрированной силы. Именно поэтому полученные значения напряжений несколько отличаются от приведенных в нормативных документах.

Как видно из таблицы 2, различия составляют  $3,5 \div 15\%$  для  $n_1 = 20$ ,  $2 \div 13\%$  для  $n_2 = 30$ ,  $6 \div 14\%$  для  $n_3 = 40$ . Наиболее обсуждаемой точкой является точка 0, где нижний фланец балки переходит в среднюю часть балки. Там разница составляет от 10 до 15%, поскольку аналитические значения, полученные нормативными документами, не включают скругления между средней частью балки на нижнем и верхнем фланцах. Это имеет большое влияние понижать значения усилия на этап концентрации. Сравнение аналитического и МКЭ методов показывает аналогичные результаты в основных точках напряжений. Как аналитический метод по [20], так и численное моделирование могут быть использованы при проектировании главных балок мостовых кранов. Различия в основном обусловлены моделированием нагрузки по-разному-в аналитическом методе сила складывается как сосредоточенная сила (только в одной точке), в МКЭ-линейная.

Метод FEM кажется более точным и дает более широкий диапазон результатов, более того позволяя проверять армированных конструкций (сварка-наложение).

Table 2

Comparison of stress values

Type of calculation	Results	Point No		
		2	1	0
FEM for $n_1 = 20$ mm	Stress [MPa]	226.6	235.4	193.4
	Difference [%]	0	0	0
Analytical for $n_1 = 20$ mm	Stress [MPa]	241.9	243.7	222.2
	Difference [%]	6.72	3.51	14.94
Analytical for $n_2 = 30$ mm	Stress [MPa]	214.7	230.3	217.1
	Difference [%]	-5.25	-2.19	12.28
Analytical for $n_3 = 40$ mm	Stress [MPa]	194.9	221.4	212.4
	Difference [%]	-13.98	-5.98	-9.87

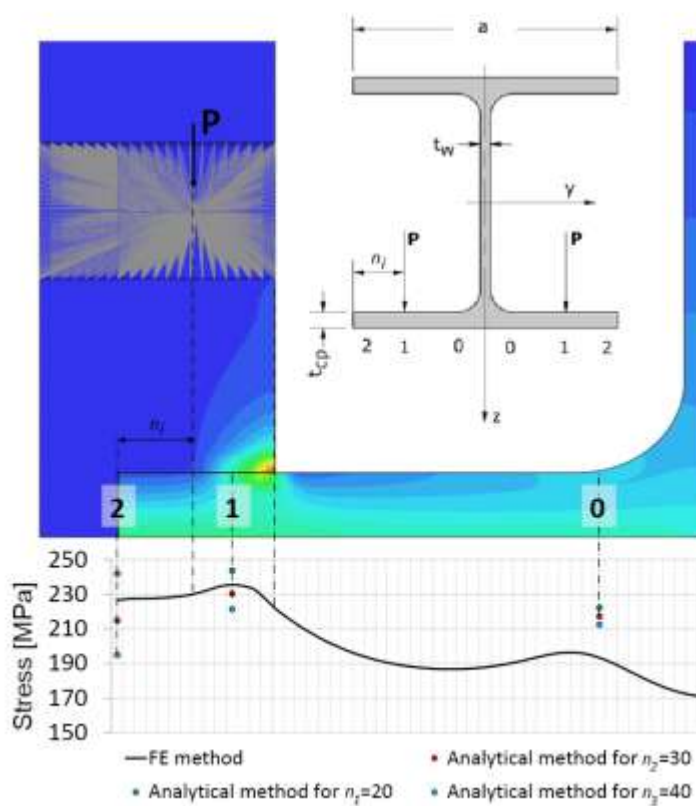


Fig. 7 Напряжений в I-луча (половина сечения) по данным Губера–Мизеса–Генки, теории (с колесом), где: P - локальной гибки силу;  $t_w$  - толщина стержня;  $n$  - расстояние от края балки до точки приложения нагрузки;  $t_{cp}$  - теоретическая толщина полки;  $a$  - ширина полки

## 7. Выводы

В случае крана определение размеров главной балки для подвесного подъемника или лебедки осуществляется на основе типовой конструкции кранов по формулам (7-9). Также необходимо в связи с этим учитывать, помимо общего изгиба, дополнительные составляющие напряжения, связанные с локальным изгибом фланцев краном или лебедкой колесных пар. Однако для усиления Нижнего фланца следует применять положения Еврокода 3 и метод конечных элементов. Для определения размеров

неподвижного проезжей части подвесных подъемников или вагонетки, свойственный нормативный акт еврокод 3, стандарт для статического вычисления и дизайн стальных структур. Представляется необходимым разработать аналитические методы, учитывающие как реальный способ моделирования нагрузки, действующей на фланцы двутавровой балки (линейная нагрузка), так и округление и насечки со стороны проникновения нижних фланцев в полотно. Целью аналитического метода является принятие в расчетах бесконечно длинных панелей с заданной шириной, таких, что соединение укрепляется, т. е., чтобы избавиться от напряжения выемки путем округления, тем самым давая более низкие значения напряжений по сравнению со значениями, полученными аналитическими расчетами. Моделирование нагрузок вызывает местные деформации нижних фланцев создает ряд проблем, в основном из-за количества элементов и времени расчета. Отметим, однако, что аналитический метод содержит много упрощений, из-за которых результаты, полученные данным методом, могут быть неточными. Значение и пригодность предлагаемого метода с точки зрения значений, полученных для укрепления Нижнего фланца, ребристого эффекта, усталостных испытаний и ребер жесткости, должны быть проверены.

### References

1. Pypno, C. 2011. Means of Transport, Katowice: Silesian University of Technology, 232 p. (in Polish).
2. Verschoof, J. 2002. Cranes – Design, Practice, and Maintenance, Professional Engineering Publishing Ltd., London and Bury St Edmunds, UK. 329 p.
3. Pavlović, G.; Stepanovic, A.; Vidaković, J.; Savković, M.; Zdravković, N. 2015. Design optimization of the box section of the single-girder bridge crane by generalized reduced gradient algorithm, *IMK-14 – Istraživanje i Razvoj u Teškoj Mašinogradnji* 21(2015) (in Serbian).
4. Znić, N.; Bošnjak, S.; Gašić, V. 2008. Loading capacities curves for I-section runway beams according to bottom flange bending and lateral buckling, *Machine Design*, 181-186 p.
5. Kohut, P.; Gaška, A.; Holak, A.; Ostrowska, K.; Sładek, J.; Uhl, T.; Dworakowski, Z. 2014. A structure's deflection measurement and monitoring system supported by a vision system, *Technisches Messen* 81(12): 635-643. <http://dx.doi.org/10.1515/teme-2014-1057>.
6. Matyja, T. 2010. Remarks on methods of calculating the crane load caused by running onto the track roughness, *Transport Problems* 5(1): 71-82.
7. Gaška, D.; Haniszewski, T. 2016. Modelling studies on the use of aluminium alloys in lightweight load-carrying crane structures, *Transport Problems* 11(3): 13-20. <http://dx.doi.org/10.20858/tp.2016.11.3.2>.
8. Davidson, J.; Yoo, C. 2003. Effects of distortion on the strength of curved I-shaped bridge girders, *Transportation Research Board 2003 Annual Meeting*. <http://dx.doi.org/10.3141/1845-06>.
9. Gaška, D.; Margielewicz, J.; Haniszewski, T.; Matyja, T.; Konieczny, Ł.; Chróst, P. 2015. Numerical identification of the overhead travelling crane's dynamic factor caused by lifting the load off the ground, *Journal of Measurements in Engineering* 3(1): 1-8.
10. Trahair, N.S. 2009. Lateral distortional buckling of monorails, *Engineering Structures* 31: 2873-2879. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.013>.
11. Hughes, A.; Iles, D.; Malik, A. 2011. Design of Steel Beams in Torsion, *SCI*, 133p.
12. Smoczek, J.; Szpytko, J. 2014. Evolutionary algorithm based design of a fuzzy TBF predictive model and TSK fuzzy anti-sway crane control system, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 28: 190-200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2013.07.013>.
13. Madhavan, M.; Davidson, J.S. 2005. Buckling of centerline stiffened plates subjected to uniaxial eccentric compression, *Thin-Walled Structures* 43(8): 1264-1276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2005.03.013>.
14. Ben, T.; Yen, B.; Kim, D.; Wilson, J. 2006. Evaluation of Displacements and Stresses in

- Horizontally Curved Beam, ATLSS Reports, Paper 74, 249 p.
15. White, D.; Zureick, A.; Phoawanich, N.; Se-Kwon, J. 2001. Development of Unified Equations for Design of Curved and Straight Steel Bridge and Girders, School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, 551 p.
  16. Mohebkhah, A. 2011. Lateral buckling resistance of inelastic I-beams under off-shear center loading, *ThinWalled Structures* 49: 431-436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2010.11.007>.
  17. ISO 16881-1:2005 Cranes — Design calculation for rail wheels and associated trolley track supporting structure.
  18. FEM 9.341:1983-10. Series lifting equipment - Rules for the design of series lifting equipment, Local girder stresses.
  19. EN 1993-6:2009. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 6: Crane supporting structures.
  20. EN 15011:2011+A1:2014. Cranes - Bridge and gantry cranes.
  21. EN 13001-3.1:2011: Cranes - General Design - Part 3-1: Limit States and proof competence of steel structure.
  22. EN 13001-2:2011: Crane safety - General design – Part 2: Load actions.
  23. Abaqus 6.13 documentation. Dassault Systems 2014.

D. Gaška, T. Haniszewski, J. Margielewicz

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С ЧИСЛЕННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ФЛАНЦАХ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ КОЛЕСА

S u m m a r y

В статье представлены однобалочные конструкции проезжей части для подвесных кранов, конвейеров и другой техники, а также различные способы их простановки с учетом специфики состояния груза, действующего на нижний фланец проезжей части в соответствии с новым стандартом EN15011:2011+A1:2014. Кроме того, представлен пример численного моделирования с использованием метода конечных элементов балочной балки мостового крана, являющейся проезжей частью ходового подъемника. Основное внимание уделяется локальным напряжениям, возникающим в Нижнем фланце, которые возникают в результате возникновения давления со стороны колес. В дополнение к доминантным усилиям от обшей гнуть, явление более низкого отклонения фланца большой важности оперируя понятиями окончательных размеров прогона. Проведено сравнение результатов моделирования с результатами аналитических расчетов.

Ключевые слова: двутавровая балка, размерность, локальное напряжение, численное моделирование.

Received March 01, 2016

Accepted June 08, 2017