ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 624.072.014.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.814-823

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ БАЛОК С РОМБОВИДНОЙ ПЕРФОРАЦИЕЙ СТЕНКИ

А.И. Притыкин, К.А. Емельянов¹

Калининградский государственный технический университет (КГТУ),
236040, г. Калининград, Советский пр-т, д. 1;

¹«Литана», 236004, г. Калининград, ул. Водная, д. 10

АННОТАЦИЯ: Предмет исследования: в связи с внедрением в строительную практику балок с ромбовидной перфорацией стенки исследовалось влияние параметров таких вырезов на прогибы балок. В настоящее время в строительных правилах как отечественных, так и зарубежных отсутствуют рекомендации по определению прогибов указанных балок, хотя нормативные требования содержатся.

Цели: разработка удобной для инженерных расчетов аналитической зависимости для оценки прогибов балок с ромбовидной перфорацией.

Материалы и методы: получение формулы для прогибов произведено с применением одного из эффективных методов расчета деформаций двутавровых перфорированных балок, основанного на использовании теории составных стержней. Некоторые числовые коэффициенты, входящие в выражение для коэффициента жесткости упругого слоя, образованного перемычками, уточнялись с помощью расчетов методом конечных элементов. В качестве критерия надежности аналитической оценки прогибов служат результаты расчета балок методом конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS.

Результаты: проверена применимость предложенной зависимости к расчету прогибов балок с разной формой ромбовидной перфорации при варьировании как высоты вырезов, так и ширины перемычек. Неизменным во всех случаях оставался только угол наклона сторон, принятый равным 60°. Приведен пример расчета перфорированной балки по рассмотренному методу. Для балок, изготовленных по безотходной технологии, когда ширина перемычек равна горизонтальной стороне выреза, при ромбовидной перфорации с постоянной относительной высотой вырезов суммарная площадь вырезов практически остается неизменной при любой ширине перемычек. Следствием этого является слабое влияние относительной ширины перемычек на прогибы балок с фиксированной высотой вырезов.

Выводы: полученная инженерная зависимость представит несомненный практический интерес для проектировщиков и может быть рекомендована для включения в своды правил РФ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогиб, аналитическая зависимость, перфорированная балка с ромбовидными вырезами, теория составных стержней, коэффициент жесткости упругого слоя, МКЭ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Притыкин А.И., Емельянов К.А. Определение прогибов балок с ромбовидной перфорацией стенки // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 814–823. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.814-823.

DETERMINATION OF DEFLECTIONS OF BEAMS WITH RHOMBIC PERFORATION OF THE WEB

A.I. Pritykin, K.A. Emelianov¹

Kaliningrad State Technical University (KSTU), 1 Sovetsky avenue, Kaliningrad, 236040, Russian Federation;
¹«Litana», 10 Vodnaya st., Kaliningrad, 236004, Russian Federation

ABSTRACT: Subject: due to a wide spread in construction practice of castellated beams with the rhomb-shaped perforation of the web, influence of parameters of such openings on beam's deflections was investigated. Currently, in the Design Codes, both domestic and international, and also in Eurocode 3, the recommendations on determination of deflections of such beams are absent although they contain regulatory requirements.

Research objectives: elaboration of analytical relationship, convenient for engineering calculations, for estimation of deflections of castellated beams with rhombic perforation of the web.

Materials and methods: derivation of the deflection formula was carried out using one of the efficient methods for calculating deformations of perforated I-beams, based on the use of the theory of compound bars. Several numerical coefficients included in the expression for the stiffness coefficient of the elastic layer, formed by web-posts, were refined by means of finite element calculations. As a criterion for reliability of the analytical expression for deflections, the results of the finite element analysis of the beam, obtained with the ANSYS software complex, are used.

Results: results of the study constitute the analytical relation for engineering calculations of deflections of castellated beams with the rhombic perforation of the web.

The applicability of the proposed dependence to the calculation of deflections for beams with different shapes of rhombic perforation is verified by varying both the height of the openings and the width of the web-posts. In all cases, only the angle of inclination of the hexagonal sides, taken equal to 60°, remains fixed. An example of analysis of a perforated beam according

to the method considered is given. For beams made by wasteless technology, when the width of the web-posts is equal to the horizontal side of the opening, for a rhomb-shaped perforation with a constant relative height of the openings, the total cut-out area remains practically unchanged for any width of the web-posts. A consequence of this is the weak influence of the relative width of the web-posts on deflections of beams with a fixed height of the openings.

Conclusions: obtained engineering relationship will certainly be of practical interest to designers and can be recommended for including into the Design Codes of the Russian Federation.

KEY WORDS: deflection, analytical relation, castellated beam with rhomb-shaped openings, theory of compound bars, stiffness coefficient of elastic layer, FEM

FOR CITATION: Pritykin A.I., Emelianov K.A. Opredelenie progibov balok s rombovidnoy perforatsiey stenki [Determination of deflections of beams with rhombic perforation of the web]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 7 (118), pp. 814–823. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.814-823.

ВВЕДЕНИЕ

С целью совершенствования строительных конструкций проектировщики постоянно разнообразят вид перфорированных балок: то делают вырезы удлиненными для прохождения систем вентиляции в балках перекрытий, то, наоборот, уменьшают ширину перемычек и ширину вырезов для более равномерного распределения жесткости по длине балки. Для снижения веса конструкции в широком диапазоне варьируется и относительная высота вырезов: от величины $\beta = h/H = 0,5$ (рис. 1, а) до $\beta = 0,73$ (рис. 1, б) и даже больше.

Как известно, одним из слабых мест перфорированных балок являются тавровые пояса над вырезами, которые испытывают местный изгиб как жестко защемленные однопролетные балочки, создавая зоны повышенных напряжений в угловых точках вырезов. В связи с этим в балках с овальными

вырезами, например, приваривают горизонтальные ребра над вырезами, повышая изгибную жесткость таких поясов и снижая уровень напряжений в них. Другим способом снижения напряжений является уменьшение длины таврового пояса за счет уменьшения горизонтальной стороны шестиугольного выреза. Одновременно это позволяет увеличить относительную высоту вырезов до предельно возможной их величины по технологическим соображениям. В итоге приходим к более рациональному использованию металла и повышению несущей способности балки за счет увеличения ее общей высоты при сохранении тех же весовых параметров.

В отличие от классической формы перфорации с вырезами в виде правильных шестиугольников (рис. 1, а) балки с ромбовидной перфорацией (рис. 1, б) имеют вырезы с уменьшенной горизонтальной стороной, т.е. приближающиеся по форме к ромбу. Подобное конструктивное решение приво-

Рис. 1. Перфорированные балки: а — с шестиугольными вырезами классической формы высотой $0,5H$; б — с ромбовидными вырезами высотой $0,73H$

Figure 1. Castellated beams: а — with hexagonal openings of classical shape of height $0.5H$; б — with rhombic openings of height $0.73H$

дит к более равномерному распределению жесткости по длине балки.

В последние несколько лет за рубежом, да и в отечественной промышленности (Ясногорский завод металлоконструкций, Пермский механический завод и др.) стали производить балки с ромбовидной перфорацией.

Одним из основных нормируемых параметров любых балок является их изгибная жесткость. Пока только в российских строительных нормах¹ требования к перфорированным балкам по обеспечению их необходимой жесткости подкреплены расчетными зависимостями, позволяющими определять прогибы балок с шестиугольными вырезами при классической схеме перфорации. Конечно, такого рода требования должны быть разработаны и для балок с другими видами перфорации, чему и посвящена данная работа.

На рис. 1 приведены балки, изготавливаемые по безотходной технологии путем разрезания стенки исходного двутавра по зигзагообразной линии с последующей сваркой получаемых половин по выступам. При использовании указанной технологии обеспечивается равенство ширины перемычки и горизонтальной стороны выреза. Именно о расчете таких балок ниже пойдет речь.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время существуют три разных метода расчета прогибов перфорированных балок: два из них аналитические, а третий численный — метод конечных элементов (МКЭ). Один из аналитических методов основан на теории составных стержней (ТСС) [1], другой — на использовании расчетной схемы безраскосной фермы Виренделя. В отечественной практике наиболее популярны расчеты по ТСС, а за рубежом распространение получил метод Виренделя, применение которого для расчета перфорированных балок одно время было внесено даже в вариант Еврокода 3².

В каждом из указанных аналитических методов имеется одно слабое звено: в методе составных стержней — коэффициент жесткости упругого слоя, образованного перемычками, а в расчетной схеме Виренделя — эффективная длина таврового пояса. В зависимости от удачного выбора указанных величин достигается хорошая точность расчетов.

Конечно, среди этих трех методов наиболее точным является МКЭ, но его применение требует, во-первых, наличия программы, а во-вторых — умения работать с ней, так как часто незначительные отклонения в описании модели или задании гранич-

ных условий могут привести к существенным искажениям результатов.

Оценке прогибов перфорированных балок посвящено немало работ отечественных исследователей [1, 2–4], в которых определение прогибов производилось с использованием ТСС. В работе [5] отмечается, что рост стоимости проката, в четыре–шесть раз превышающий рост стоимости рабочей силы, делает целесообразным более широкое применение перфорированных балок, ведущее к снижению веса конструкций. В большинстве зарубежных публикаций [6–17] исследования, проведенные либо МКЭ, либо экспериментально, относятся к классической перфорации стенки в виде правильных шестиугольников. Только в работе [11] приведены результаты испытаний балок с ромбовидными вырезами.

Ниже будет произведена оценка жесткости балок с шестиугольными вырезами как правильной, так и ромбовидной формы. Рассмотрим расчет прогибов перфорированных балок по теории составных стержней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись балки из стали. Получение формулы для прогибов произведено с применением одного из эффективных методов расчета деформаций двутавровых перфорированных балок, основанного на использовании теории составных стержней. Некоторые числовые коэффициенты, входящие в выражение для коэффициента жесткости упругого слоя, образованного перемычками, уточнялись с помощью расчетов методом конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет прогибов перфорированных балок по ТСС. Вначале опишем конструктивные размеры балки с ромбовидной перфорацией, расчетная схема которой представлена на рис. 2.

Если для обозначения балки с классической перфорацией достаточно было использовать запись вида $l - H - t_w - b_f - t_f - \beta - \eta$, то к размерам балки с ромбовидной перфорацией добавляется еще один

Рис. 2. Расчетная схема балки с ромбовидной перфорацией

Figure 2. Calculation model of the beam with rhombic perforation

¹ СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования.

² Eurocode 3. ENV 1993-1-1:1993. Design of steel structures.

параметр ϑ , представляющий собой угол наклона стороны a шестиугольника к оси абсцисс (рис. 2).

В принятом обозначении входящие величины интерпретируются как: l — длина балки; H — полная ее высота; t_w — толщина стенки; b_f — ширина полки; t_f — толщина полки; $\beta = h/H$ — относительная высота вырезов; $\eta = c/a$ — относительная ширина перемычки (c — ширина перемычки в наиболее узкой части ее; b — ширина выреза).

Как видно из рис. 2, в балке с ромбовидными вырезами ширина перемычки c всегда равна горизонтальной стороне выреза (в принятом условном обозначении линейные размеры балки указываются в сантиметрах).

В случае ромбовидных вырезов относительная ширина перемычек η определяется уже не двумя параметрами a и c , как в варианте с шестиугольными вырезами правильной формы, а тремя — a , ϑ и c , поскольку стороны шестиугольника получаются разными. Величину η можно вычислить как

$$\eta = c/b = (1 + 2 \cos \vartheta / \varepsilon)^{-1}. \quad (1)$$

Здесь принято обозначение $\varepsilon = c/a$. Если угол наклона сторон равен $\vartheta = 60^\circ$, то выражение (1) примет вид

$$\eta = \varepsilon / (\varepsilon + 1). \quad (2)$$

Как показано Г.В. Бойцовым [18], для шарнирно опертой однопролетной двутавровой балки со сплошной стенкой, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, полную величину прогиба w , учитывающего деформацию сдвига, можно приближенно определить как

$$w \approx w^{TT} \left(1 + 0,5 \left(\frac{5H}{l} \right)^2 \left(\frac{1}{6} + \frac{\omega_n}{\omega_c} \right) \right), \quad (3)$$

где ω_n — площадь полки; ω_c — площадь стенки. В выражении (3) первое слагаемое представляет собой прогиб от изгиба, а второе — сдвиговую компоненту прогиба.

Аналогично зависимости (3) для балки с классической перфорацией, когда шестиугольные вырезы имеют правильную форму (см. рис. 1, а), в работе [2] было получено решение задачи о прогибах перфорированной балки в виде

$$w_{\text{перф}} = w^{TT} (1 + I/2iK_c^*). \quad (4)$$

Здесь через $w^{TT} = 5ql^4 / (384EI)$ обозначен прогиб шарнирно опертой балки под действием распределенной нагрузки q , а через K_c^* — безразмерный коэффициент, определяемый по зависимости

$$K_c^* = K_c l^2 / (\pi^2 iEA). \quad (5)$$

В выражении (5) величина K_c представляет собой коэффициент жесткости упругого слоя, об-

разованного перемычками; I — среднее значение моментов инерции балки, вычисленных по сечению с отверстием и по перемычке, относительно нейтральной оси; i — момент инерции таврового пояса балки относительно собственной нейтральной оси; A — площадь поперечного сечения таврового пояса; E — модуль Юнга.

Среднее значение момента инерции I вычисляется как

$$I = I_{\text{спл}} - h^3 t_w / 24, \quad (6)$$

где $I_{\text{спл}}$ — момент инерции сечения сплошной балки, т.е. балки без вырезов.

Площадь поперечного сечения таврового пояса A вычисляется как

$$A = b_f t_f + (H/2 - t_f - \beta H/2) t_w. \quad (7)$$

Из сопоставления зависимостей (3) и (4) видно, что второе слагаемое в (4) для $w_{\text{перф}}$ учитывает компоненту сдвига стенки балки, обусловленную наличием перфорации.

Основная сложность решения задачи по теории составных стержней заключается в определении коэффициента жесткости упругого слоя K_c , являющегося функцией высоты вырезов h , относительной ширины перемычки η , толщины стенки t_w , формы перемычки и материала балки E и μ , а также условий ее опирания. Величина K_c может быть определена либо экспериментально путем проведения статических испытаний перфорированной балки, либо базируясь на расчетах балки МКЭ. В работе [2] был принят второй подход.

Коэффициент жесткости упругого слоя K_c для шарнирно опертой балки при шестиугольных вырезах правильной формы можно вычислить по зависимости

$$K_c = G t_w / \alpha(\eta) h, \quad (8)$$

где $G = E / (2(1 + \mu))$ — модуль сдвига; $\mu = 0,3$ — коэффициент Пуассона; $\alpha(\eta)$ — коэффициент, зависящий от вида закрепления балки (шарнирное опирание или жесткая заделка) и от параметра η .

Зависимость $\alpha(\eta)$ для шарнирно опертой балки с высотой вырезов $h = 0,667H$ можно аппроксимировать полиномом

$$\alpha(\eta) = 21,64\eta^2 - 28,8\eta + 17,1. \quad (9)$$

В окончательном виде выражение для прогиба (4) балки с классической перфорацией с учетом (5) и (8) приобретает вид

$$w_{\text{перф}} = w^{TT} \left(1 + 1,3\pi^2 h A \alpha(\eta) / (t_w l^2) \right). \quad (10)$$

Все расчеты прогибов по ТСС (10) удобно выполнять с помощью электронных таблиц Excel. Зависимость (10) применима для балок с классической перфорацией с любой шириной перемычек в диапазоне $0,15 \leq \eta \leq 0,5$.

Рассмотрим теперь деформацию перфорированной балки при наличии ромбовидных шестиугольных вырезов в стенке как показано на рис. 2.

Приведенные выше зависимости могут быть применены и к расчету прогибов балки с ромбовидными вырезами, однако надо уточнить величину коэффициента жесткости упругого слоя K_c , анализируя результаты расчета прогибов, полученные МКЭ. Величина η определяется по зависимости (2).

Расчеты прогибов балок МКЭ. Произведем расчет балок, показанных на рис. 3, с параметрами $1050 - 75 - 1 - 17 - 1,52 - 0,667 - \eta - 60^\circ$. Будем исследовать перфорированные балки, в которых шестиугольные вырезы первоначально правильной формы последовательно сужаются за счет уменьшения их горизонтальных сторон c , сохраняя неизменным угол $\theta = 60$ наклона сторон a .

В обозначениях на рис. 3 в качестве η рассматривается величина, определяемая по (2) при $\xi = c/a$. Оценим прогибы указанных на рис. 3 балок, воспользовавшись МКЭ. Результаты расчетов показаны на рис. 4. Величина n указывает количество вырезов.

Как видно из представленных на рис. 4 результатов, изменение относительной ширины перемычек у балок с ромбовидной перфорацией практически не влияет на величину прогиба. Расхождение в прогибах балки с классической схемой перфорации с величиной $\eta = 0,5$ (см. рис. 4, *a*) и с узкими

перемычками при $\eta = 0,167$ (см. рис. 4, *z*) не превышает 2,2 %.

Судя по полученным данным, можно предположить, что прогибы балки с ромбовидной перфорацией тесно связаны с площадью вырезов в стенке. Ведь у всех рассмотренных выше балок суммарная площадь вырезов $A_{\text{выр}}$ почти одинакова. Действительно, ее можно определить по формуле

$$A_{\text{выр}} = n(2,6a^2 - (1-\varepsilon)ah). \quad (11)$$

Подсчет величины $A_{\text{выр}}$ для указанных выше балок приведен в таблице.

Как видно из (3), при постоянной величине l/H уменьшение площади стенки вследствие перфорации ведет к росту составляющей прогиба балки от сдвига. Но если площадь перфорированной стенки ω_c , как и площадь полки ω_n , остаются постоянными, то при заданной относительной длине балки l/H прогиб, судя по соотношению (3), также будет постоянной величиной, что и наблюдается в расчетах МКЭ.

Произведем еще расчет балок, показанных на рис. 5, с параметрами $1050-75-1-17-1,52$ см– $0,73-\eta-60^\circ$, т.е. с увеличенной до $h = 0,73H$ высотой вырезов. Как видим, и в этом случае прогибы всех балок, за исключением балки с классической перфорацией, практически одинаковы, различие в прогибах в пределах 2 %. Только у балки с $\eta = 0,5$ (рис. 5, *a*) прогиб по сравнению с балкой с $\eta = 0,167$

Рис. 3. Форма перфорации стенки при разной ширине перемычек: *a* — $\eta = 0,5$; *b* — $\eta = 0,375$; *в* — $\eta = 0,286$; *z* — $\eta = 0,167$

Figure 3. Shape of web perforation under different width of web-posts: *a* — $\eta = 0.5$; *b* — $\eta = 0.375$; *c* — $\eta = 0.286$; *d* — $\eta = 0.167$

Рис. 4. Прогибы балок 1050–75–1–17–1,52 см–0,667– η –60° с разными параметрами перфорации: *a* — $\eta = 0,5$; $n = 12$; *б* — $\eta = 0,375$; $n = 16$; *в* — $\eta = 0,286$; $n = 20$; *г* — $\eta = 0,167$; $n = 25$

Figure 4. Deflections of beams 1050–75–1–17–1.52 cm–0.667– η –60° with the different perforation parameters: *a* — $\eta = 0.5$; $n = 12$; *b* — $\eta = 0.375$; $n = 16$; *c* — $\eta = 0.286$; $n = 20$; *d* — $\eta = 0.167$; $n = 25$

Суммарная площадь вырезов в балке с ромбовидной перфорацией при $\beta = 0,667$

Total area of openings in a beam with rhombic perforation for $\beta = 0.667$

	Количество вырезов n / Number of openings n			
	12	16	20	25
Параметр ε / Parameter ε	1	0,6	0,4	0,2
Площадь $A_{\text{выр}}$ (11) / Area A_{cut} (11)	$31,2a^2$	$30,5a^2$	$31,2a^2$	$30,4a^2$

(рис. 5, *г*) больше на 6,1 %. В среднем увеличение относительной высоты вырезов с $\eta = 0,667$ до $\eta = 0,73$ приводит к росту прогибов балок с ромбовидной перфорацией примерно на 4 %.

Выше оценивалось деформированное состояние балок с относительной длиной $l/H=14$. Как видно из (3), у балок с большим параметром l/H влияние деформации сдвига снижается.

Рис. 5. Прогибы балок 1050–75–1–17–1,52 см–0,73–η–60° с разными параметрами перфорации: *a* — η = 0,5; *n* = 11; *б* — η = 0,375; *n* = 15; *в* — η = 0,286; *n* = 18; *г* — η = 0,167; *n* = 23

Figure 5. Deflections of beams 1050–75–1–17–1,52 cm–0,73–η–60° with the different perforation parameters: *a* — η = 0,5; *n* = 11; *b* — η = 0,375; *n* = 15; *c* — η = 0,286; *n* = 18; *d* — η = 0,167; *n* = 23

Расчеты, произведенные для длинных балок с $l/H = 27$, показанных на рис. 1, с параметрами 2025–75–1–17–1,52 см–0,73–η–60°, также подтвердили малое влияние вида перфорации на их изгибную жесткость (рис. 6). Как видим, и в этом случае прогибы всех балок практически одинаковы. Различие в прогибах (см. рис. 6, *a* и *в*) при постоянной высоте вырезов находится в пределах 0,5 %.

На основании выполненных МКЭ расчетов можно сделать вывод, что при ромбовидной перфорации коэффициент жесткости упругого слоя K_c не будет зависеть от относительной ширины перемычек η, а примет вид

$$K_c^{\text{ромб}} = Gt_w/kh, \quad (12)$$

где k — числовой коэффициент.

Приемлемым значением будет $k = 2,7$, тогда выражение для $K_c^{\text{ромб}}$ (12) примет вид

$$K_c^{\text{ромб}} = Gt_w/(2,7h). \quad (13)$$

Подставляя формулу (13) в (5), а затем в (4), получим выражение для прогиба балки с ромбовидной перфорацией в виде

$$w_{\text{перф}} = w^{TT} (1 + 104\beta HA/t_w l^2). \quad (14)$$

Таким образом, для вычисления прогиба балки с ромбовидной перфорацией, у которой ширина перемычек всегда равна горизонтальной стороне выреза, достаточно знать ее геометрические параметры и относительную высоту вырезов β.

Сопоставление расчетов по ТСС и МКЭ. Проверим полученные результаты, сравнив дан-

Рис. 6. Прогибы балок 2025–75–1–17–1.52 см–0.73–η–60° с разными параметрами перфорации: *a* — η = 0,375; *n* = 29; *b* — η = 0,286; *n* = 35; *в* — η = 0,167; *n* = 45

Figure 6. Deflections of beams 2025–75–1–17–1.52 cm–0.73–η–60° with the different perforation parameters: *a* — η = 0.375; *n* = 29; *b* — η = 0.286; *n* = 35; *c* — η = 0.167; *n* = 45

ные расчетов по ТСС и МКЭ. Приведем вычисления прогибов балки размером 1050–75–17–1,52 см–0,667–η–60° по зависимости (14) для разных относительных высот вырезов.

Определим вначале необходимые величины, входящие в зависимость (14):

- средний момент инерции перфорированной балки по (6)

$$I = 0,5 \cdot 17 \cdot 1,52 \cdot 73,48^2 + 71,96^3 \cdot 1,52 \cdot 1/12 - 50^3 \cdot 1/24 = 95\,603 \text{ см}^4; \quad (15)$$

- площадь таврового пояса в соответствии с (7) примет значение

$$A = 17 \cdot 1,52 + ((75/2 - 1,52 - 0,667 \cdot 75) \cdot 1,52) = 25,84 + 10,98 = 36,82 \text{ см}^2; \quad (16)$$

- прогиб балки по технической теории изгиба с учетом (15)

$$w_{\text{перф}}^{\text{ТТ}} = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 \cdot 10 \cdot 1050^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 95\,603} = 7,88 \text{ мм}. \quad (17)$$

С учетом полученных значений (15)–(17) определяем прогиб перфорированной балки, представленной на рис. 4, з, по ТСС (14)

$$w^{\text{ТСС}} = 7,88(1 + 104 \cdot 0,667 \cdot 75 \cdot 36,82 / (1 \cdot 1050)^2) = 9,25 \text{ мм}. \quad (18)$$

Расчет МКЭ (рис 4, з) дает результат $w_{\text{перф}}^{\text{МКЭ}} = 9,23 \text{ мм}$. Как видим, расхождение в значениях по ТСС (18) и МКЭ не превышает 0,3 %. При величине β = 0,73 значение прогиба по (14) будет $w^{\text{ТСС}} = 9,38 \text{ мм}$. Расхождение со значением $w_{\text{перф}}^{\text{МКЭ}} = 9,6 \text{ мм}$ (рис. 5, з) составляет 2,5 %.

Таким образом, полученная зависимость для прогибов балок с ромбовидными вырезами (14) дает результаты, удовлетворительно коррелирующие с расчетами МКЭ.

ВЫВОДЫ

1. Ромбовидная перфорация в отличие от классической позволяет за счет уменьшения горизонтальной стороны вырезов увеличить их относительную высоту (рис. 1) и тем самым повысить несущую способность балки при тех же весовых параметрах. К тому же она делает более равномерным распределение изгибной жесткости по длине.

2. Из зависимости (14), проверенной в диапазонах относительных высот вырезов $0,667 \leq h/H \leq 0,73$ и относительных длин $14 \leq l/H \leq 27$, видно, что при фиксированном угле наклона сторон прогибы таких балок не зависят от ширины перемычек.

3. При заданной высоте вырезов и фиксированном угле наклона сторон изгибная жесткость балки

с ромбовидной перфорацией, изготовленной по безотходной технологии, при любой ширине переемычек остается постоянной, поэтому и величина прогиба практически не изменяется.

4. Приемлемость зависимости (14) подтверждена результатами расчетов МКЭ с помощью программного комплекса ANSYS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Притыкин А.И. Прогибы перфорированных балок с шестиугольными вырезами: две формы решения // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 12. С. 53–54.
2. Притыкин А.И. Влияние сдвига на деформации перфорированных балок с шестиугольными вырезами // Известия вузов. Строительство. 2012. № 3. С. 111–118.
3. Проектирование металлических конструкций: спец. курс. Л., 1990. 432 с.
4. Соловьев А.В., Васюков И.А. Анализ жесткостных характеристик перфорированных балок с круглой перфорацией стенки // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 36–38.
5. Полевицков А.С., Елькина Л.В., Крутин М.Н. Перфорированные балочные конструкции // Advanced Science. 2017. № 3. С. 300–307.
6. Hosain M.U., Cheng V.V. Deflection analysis of expanded open-web steel beams. // Computers and Structural. 1974. Vol. 4. No. 2. Pp. 327–336.
7. Gardner N.J. An investigation into the deflection behavior of castellated beams // Transaction of the Engineering Institute of Canada. 1969. Vol. 9. No. A.7. Pp. 56–64.
8. Gibson J.E., Jenkins B.S. An investigations of the stress and deflection in castellated beams // Structural Engineer. 1957. No. 12. Pp. 464–479.
9. Havbok M.M., Hosain M.U. Castellated beams deflection using substructuring // Journal of the structural Division Proceedings of the ASCE. 1977. Vol. 103. No. 1. Pp. 265–269.
10. Raftoyiannis I.G., Ioannidis G.I. Deflection of Castellated beams under Transverse Loading // Steel Structures. 2006. No. 6. Pp. 31–36.
11. Jamadar F.M., Kumbhar P.D. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings // International Research Journal of Engineering and Technology. 2015. vol. 2. No. 2. pp. 715–722.
12. Pritykin A.I., Lavrova A.S. Prediction of the stress level and stress concentration in cellular beams with circular openings // Mechanika. 2017. No. 3. Pp. 61–66.
13. Lagros N.D., Psarras L.D., Papadrakakis M., Panagiotou G. Optimum design of steel structures with web opening // Journal of Engineering Structures. 2008. Vol. 30. No. 4. Pp. 2528–2537.
14. Liu T.C., Chung K.F. Steel beam with large web opening of various shapes and sizes: Finite element investigation // Journal of Constructional Steel Research. 2003. Vol. 59. Pp. 1159–1176.
15. Chung K.F., Liu T.C., Ko A.C. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings // Journal of Constructional Steel Research. 2001. Vol. 57. Pp. 467–490.
16. Devinis B., Kvedaras A.K. Investigation of rational depth of castellated steel i- beam // Journal of Civil Engineering and Management. 2008. Vol. 149. No. 3. Pp. 163–168.
17. Durif S., Bouchair A., Vassart O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 82. No. 1. Pp. 72–87.
18. Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А. и др. Справочник по строительной механике корабля: в 3 т. Т. 1. Л. : Судостроение, 1982. 376 с.

Поступила в редакцию 1 июня 2017 г.

Принята в доработанном виде 29 сентября 2017 г.

Одобрена для публикации 31 мая 2018 г.

ОБ АВТОРАХ: Притыкин Алексей Игоревич — доктор технических наук, профессор кафедры кораблестроения, Калининградский государственный технический университет (КГТУ), 236040, г. Калининград, Советский пр-т, д. 1; Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта), 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14, prit_alex@mail.ru; ORCID ID 0000-0002-6597-8558;

Емельянов Константин Анатольевич — ведущий инженер-конструктор, ООО «Литана», 236004, г. Калининград, ул. Водная, д. 10, k.emel@ako-group.ru.

REFERENCES

1. Pritykin A.I. Progiбы perforirovannykh balok s shestiyugol'nymi vyrezami: dve formy resheniya [Deflections of perforated beams with hexagonal necks: two forms of solution]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2015, no. 12, pp. 53–54. (In Russian)
2. Pritykin A.I. Vliyanie sdviga na deformatsii perforirovannykh balok s shestiyugol'nymi vyrezami [Effect of shear on the deformation of perforated beams with hexagonal notches]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012, no. 3, pp. 111–118. (In Russian)
3. *Proektirovanie metallicheskih konstruktsiy: spets. kurs* [Design of metal structures: special course]. Leningrad, 1990. 432 p. (In Russian)
4. Solov'ev A.V., Vasyukov I.A. Analiz zhestkostnykh kharakteristik perforirovannykh balok s krugloy perforatsiyey stenki [Analysis of the stiffness characteristics of perforated beams with round wall perforations]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2014, no. 3, pp. 36–38. (In Russian)
5. Polevshchikov A.S., El'kina L.V., Krupin M.N. Perforirovannye balochnye konstruktsii [Perforated beam structures]. *Advanced Science*. 2017, no. 3, pp. 300–307. (In Russian)
6. Hosain M.U., Cheng V.V. Deflection analysis of expanded open-web steel beams. *Computers and Structural*. 1974, vol. 4, no. 2, pp. 327–336.
7. Gardner N.J. An investigation into the deflection behavior of castellated beams. *Transaction of the Engineering Institute of Canada*. 1969, vol. 9, no. A.7, pp. 56–64.
8. Gibson J.E., Jenkins B.S. An investigations of the stress and deflection in castel-lated beams. *Structural Engineer*. 1957, no. 12, pp. 464–479.
9. Havbok M.M., Hosain M.U. Castellated beams deflection using substructuring. *Journal of the structural Division Proceedings of the ASCE*. 1977, vol. 103, no. 1, pp. 265–269.
10. Raftoyiannis I.G., Ioannidis G.I. Deflection of castellated beams under transverse loading. *Steel Structures*. 2006, no. 6, pp. 31–36.
11. Jamadar F.M., Kumbhar P.D. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015, vol. 2, no. 2, pp. 715–722.
12. Pritykin A.I., Lavrova A.S. Prediction of the stress level and stress concentration in cellular beams with circular openings. *Mechanika*. 2017, no. 3, pp. 61–66.
13. Lagros N.D., Psarras L.D., Papadrakasis M., Panagiotou G. Optimum design of steel structures with web opening. *Journal of Engineering Structures*. 2008, vol. 30, no. 4, pp. 2528–2537.
14. Liu T.C., Chung K.F. Steel beam with large web opening of various shapes and sizes: Finite element investigation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2003, vol. 59, pp. 1159–1176.
15. Chung K.F., Liu T.C., Ko A.C. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001, vol. 57, pp. 467–490.
16. Devinis B., Kvedaras A.K. Investigation of rational depth of castellated steel i-beam. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2008, vol. 149, no. 3, pp. 163–168.
17. Durif S., Bouchair A., Vassart O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013, vol. 82, no. 1, pp. 72–87.
18. Boytsov G.V., Paliy O.M., Postnov V.A. et al. *Spravochnik po stroitel'noy mekhanike korablya* [Reference book on ship mechanics]: 3 vols. Vol. 1. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 376 p. (In Russian)

Received June 1, 2017.

Adopted in final form on September 29, 2017.

Approved for publication May 31, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Pritykin Aleksey Igorevich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Shipbuilding, **Kaliningrad State Technical University (KGTU)**, 1 Sovetskiy prospekt, Kaliningrad, 236040, Russian Federation; **Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU)**, 14 A. Nevskogo str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation; prit_alex@mail.ru; ORCID ID 0000-0002-6597-8558;

Emelianov Konstantin Anatol'evich — Leading Design Engineer, OOO «Litana», 10 Vodnaya str., Kaliningrad, 236004, Russian Federation; k.emel@ako-group.ru.