

УДК 69.024.81

Кузнецов Иван Леонидович

доктор технических наук, профессор

E-mail: kuz377@mail.ru

Пеньковцев Сергей Александрович

кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: restavratsija@mail.ru

Гимранов Линур Рафаилович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: leenur@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420034, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Перфорированная балка с поясами из стальных профилей

Аннотация

Поставленные задачи. Перфорированные балки, используемые в несущих конструкциях зданий и сооружений занимают нишу между балками сплошного сечения и фермами и используется при значительных пролетах и малых нагрузках. Целью статьи является разработка конструкций перфорированных балок, исключая раскрой и разрезку проката, не требующих сложного технологического оборудования для их изготовления и реализующих принцип равнопрочности сечений поясов балки.

Результат. Анализ изготовления и эксплуатации существующих типов перфорированных балок позволил определить общие недостатки данных конструкций: неравнопрочность сечений верхнего и нижнего поясов и заведомый перерасход металла, обусловленный дискретностью сортамента донорских прокатных двутавров.

Предлагаемая конструкция состоит из верхнего и нижнего пояса из прокатных профилей, соединенных листовыми вставками. При этом верхний пояс изготавливается из двутавра, а нижний – из стальной полосы или прокатного тавра. Такая конструкция исключает раскрой и разрезку проката и не требует сложного технологического оборудования для производства балок. Кроме того, в конструкции данной балки принцип равнопрочности может быть реализован в результате применения в поясах проката с повышенными прочностными характеристиками. В статье дается оценка несущей способности и сравнение технических характеристик предлагаемой конструкции перфорированной балки с существующими решениями перфорированных балок.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что разработанная конструкция перфорированной балки в сравнении с известными решениями дает значительный эффект (до 13 %) экономии приведенной массы, при одновременной упрощении технологии производства.

Ключевые слова: перфорированная балка, донорский двутавр, пояса из профильного проката, листовые вставки.

Введение

При создании несущих конструкций зданий и сооружений широкое применение получили перфорированные балки (ПБ). Эта конструкция получается путём разрезки стенки донорского двутавра по ломанной линии с последующей сваркой встык частей двутавра по выступающим гребням разрезанной стенки [1, 4, 7]. В результате высота полученного сквозного двутавра увеличивается в сравнении с донорским примерно в 1,5 раза, и, как следствие, увеличиваются момент инерции и момент сопротивления сечения. Несущая способность при этом увеличивается в 1,3-1,5 раза. Данный тип балок широко применяется в гражданском, промышленном, транспортном строительстве и занимает нишу между балками сплошного сечения и фермами. Перфорированные балки используются в основном при значительных пролетах и малых нагрузках. Разработаны методики расчета и конструирования подобных балок, заключающиеся в выборе исходного двутавра сплошного сечения, определении геометрических параметров получаемой из него в результате раскроя перфорированной балки сквозного сечения и

проверки прочности, общей и местной устойчивости балки с учетом принятой геометрии реза [3, 7]. В ходе разработки и совершенствования данного типа балок использовались различные линии разрезки стенки донорского двутавра, благодаря чему при сварке образовывались разные перфорационные отверстия: шестиугольные, восьмиугольные, прямоугольные, овальные, имеющие те или иные частные преимущества [1, 3, 4, 7]. Также нашли применение ПБ увеличенной высоты, получаемые за счет применения листовых вставок, свариваемых встык по выступающим гребням разрезанной стенки частей двутавра. Следующим этапом развития применения ПБ является применение бистальных ПБ, в которых сталь повышенной прочности применяется только в наиболее напряженных участках (поясах) балок, что позволяет уменьшить удельный вес балки при одинаковой несущей способности. Вместе с тем, изготовление указанных типов ПБ требует применения специальных кондукторов с гидравлическими прижимами или вальцов, так как обе половины донорской балки после разрезки искривляются вследствие остаточных напряжений в прокатных профилях. Поэтому такие балки целесообразно применять только при массовом изготовлении [4, 5, 6, 8, 9, 10]. Также общим недостатком данного конструктивного решения ПБ является неравнопрочность сечений верхнего и нижнего поясов и заведомый перерасход металла, обусловленный дискретностью сортамента донорских прокатных двутавров. В результате снижается расход стали на 5-7 %, уменьшается общая стоимость.

В результате анализа состояния совершенствования конструктивных решений ПБ была предложена конструкция ПБ, лишенная вышеуказанных недостатков.

Предлагаемая конструкция перфорированной балки (рис. 1) состоит из верхнего и нижнего пояса из прокатных профилей, соединенных листовыми вставками. При этом верхний пояс изготавливается из двутавра, а нижний – из стальной полосы или прокатного тавра. Такая конструкция исключает раскрой и разрезку проката и не требует сложного технологического оборудования для производства балок. Кроме того, в конструкции данной балки принцип равнопрочности может быть реализован в результате применения в поясах проката с повышенными прочностными характеристиками.

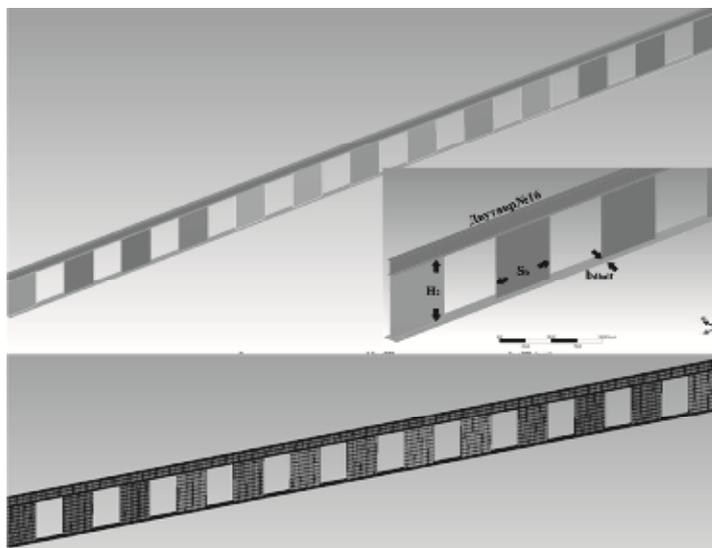


Рис. 1. Балка из прокатных профилей, соединенных листовыми вставками:
а) расчетная модель балки; б) варьируемые параметры; в) конечно-элементная модель

Численные исследования напряженно деформированного состояния балки

Численные исследования напряженно деформированного состояния балки пролетом 18 м производились на ПК Ansys Academic [2] с моделированием компонентов балки пластинчатыми элементами. При этом осуществлялась оптимизационная задача по отысканию значений варьируемых параметров минимизирующих массу балки при условии не превышения критических значений прогибов и приведенных напряжений.

Варьируемые параметры в балке:

- S_b – ширина листовой вставки;
- H_2 – высота листовой вставки;
- b_{dhalf} – свес нижнего поясного листа; n – число проемов в балке.

Оценочные параметры, используемые в оптимизационной задаче:

- Масса балки в (кг);
- Максимальные приведенные напряжения в любой точке балки (либо в пролете, либо в приопорной зоне) в (МПа);
- Максимальный прогиб от расчетной нагрузки (мм).

Использование конечно-элементной модели выполненной из пластинчатых элементов позволило существенно сократить компьютерное время, т.к. количество конечных элементов не превышало 10-15 тыс.

Модуль оптимизации программного комплекса использует алгоритм оптимизации, основанный на последовательном решении множества расчетных моделей с варьируемыми параметрами, лежащими в определенном пользователе диапазоне. Далее используя оценочные параметры, производится аппроксимация зависимостей и степень влияния каждого варьируемого параметра на оценочные параметры. Для каждого соотношения параметров тем самым возможно построение графиков зависимости двух выбранных оценочных параметров от изменения значения варьируемого параметра.

После определения пользователем критериев оценочных параметров выбирается наиболее подходящий модель кандидат из множества моделей кандидатов с разными параметрами наиболее подходящим для критериев оценки.

Особенностью напряженно-деформированного состояния предлагаемой балки также как и перфорированной балки является то, что расчетное сечение может смещаться по пролету в зависимости от конфигурации проемов. Конструктивная форма балки такова, что взаимный сдвиг поясов друг относительно друга вызывает в верхнем поясе локальный изгибающий момент, в то время как в нижнем поясе он отсутствует вследствие его малой изгибной жесткости. Поэтому выполнение задачи по оптимизации требует поиска компромиссных значений варьируемых параметров, например, увеличение высоты сечения балки (путем увеличения высоты листовой вставки H_2) приводит к увеличению локального момента от взаимного сдвига поясов, приводя к достижению предельного состояния в точке примыкания листовой вставки к верхнему поясу, а не в крайних фибрах поясов. Таким образом, для компенсации этих локальных напряжений требуется увеличение длины листовой вставки S_b что в свою очередь ведет к увеличению массы балки.

Аналогом пластинчатой конечно-элементной модели балки с листовыми вставками может служить стержневая модель балки Веренделя, в которой поперечные планки жестко зашпелены в верхнем поясе, при этом нижний пояс прикреплен к ним шарнирно, при этом изгибная жесткость листовых вставок в плоскости балки должна соответствовать их длине S_b .

Следует также отметить, что использование пластинчатой модели позволяет сразу учитывать в расчетной модели эффекты от действия локальных напряжений.

В рассматриваемой задаче при исходных данных – пролет 18 м, погонная нагрузка 1000 кг/м, Сталь С345, верхний пояс двутавр № 16, толщина соединительных вставок 6мм, толщина поясного листа нижнего пояса 10 мм, получены следующие оптимальные значения варьируемых параметров табл. 1

Оптимальные значения варьируемых параметров и соответствующие им оценочные параметры.

Таблица 1

b_{dhalf} (м)	S_b (м)	n (шт.)	H_2 (м)
0,0918	0,74183	12	0,7151

Таблица 1а

Масса балки (кг)	Приведенные напряжения (МПа)	Прогиб (мм)
875,87	326,42	111,32

Анализируя результаты оптимизации можно сказать следующее:

- оптимальное соотношение высоты листовой вставки H_2 к ее длине S_b составляет 0,965;
- оптимальное соотношение длины вставки к длине проема равного $(18 \text{ м} - (n+1)S_b)/n = 0,697 \text{ м}$ составит 1,063.

Для указанных значений построены графики локального влияния параметра на оценочные параметры рис. 2-4.

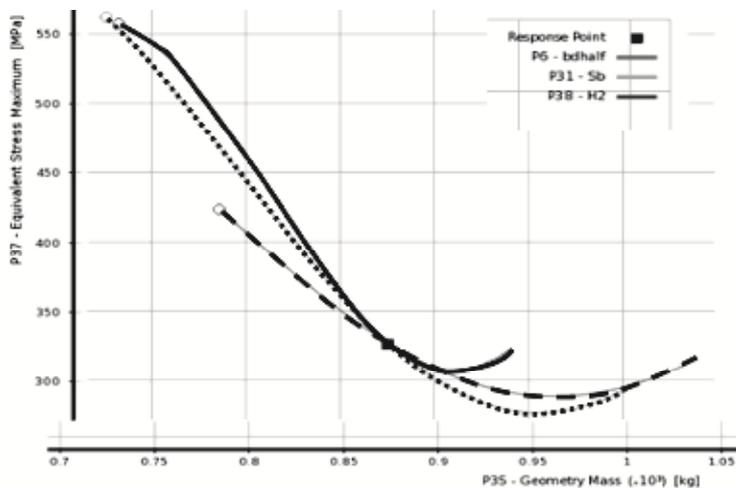


Рис. 2. Зависимость изменения варьируемых параметров от массы балки и приведенных напряжений

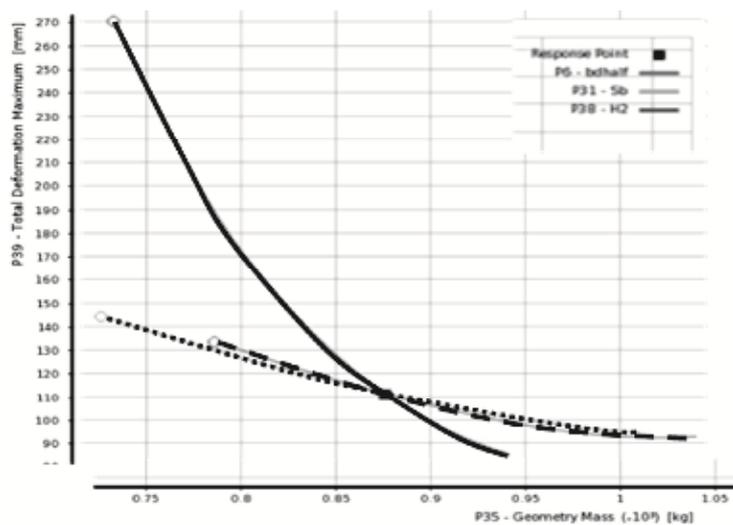


Рис. 3. Зависимость изменения варьируемых параметров от массы балки и прогибов балки

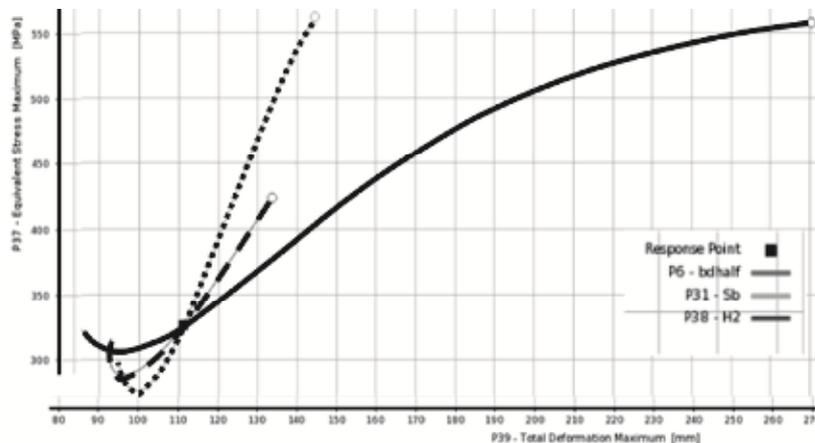


Рис. 4. Зависимость изменения варьируемых параметров от прогибов балки и приведенных напряжений

Оптимальные значения параметров лежат на пересечении кривых для каждого параметра при этом начальное значение варьируемого параметра отмечено кругом. Балка с оптимально подобранными варьируемыми параметрами показывает значительную экономию металла (до 14 %) в сравнении с классическими конструкциями ПБ. Прогибы в балке приведены на рис. 5. Распределение нормальных напряжений в данной балке приведено на рис. 6а. Распределение приведенных напряжений в балке приведено на рис. 6б.

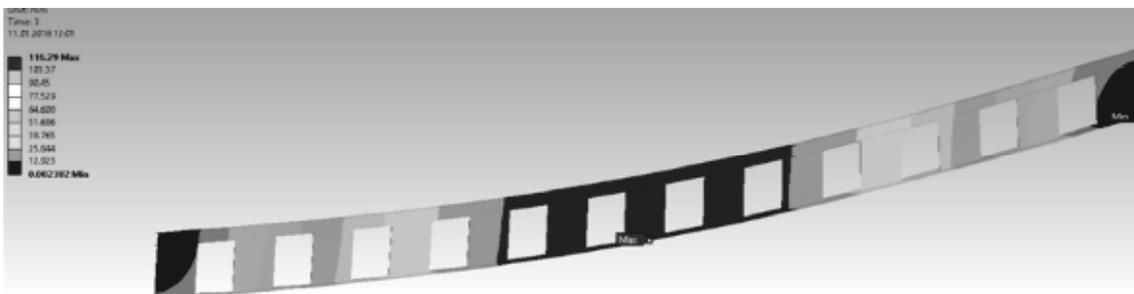


Рис. 5. Прогибы в балке с оптимально подобранными параметрами

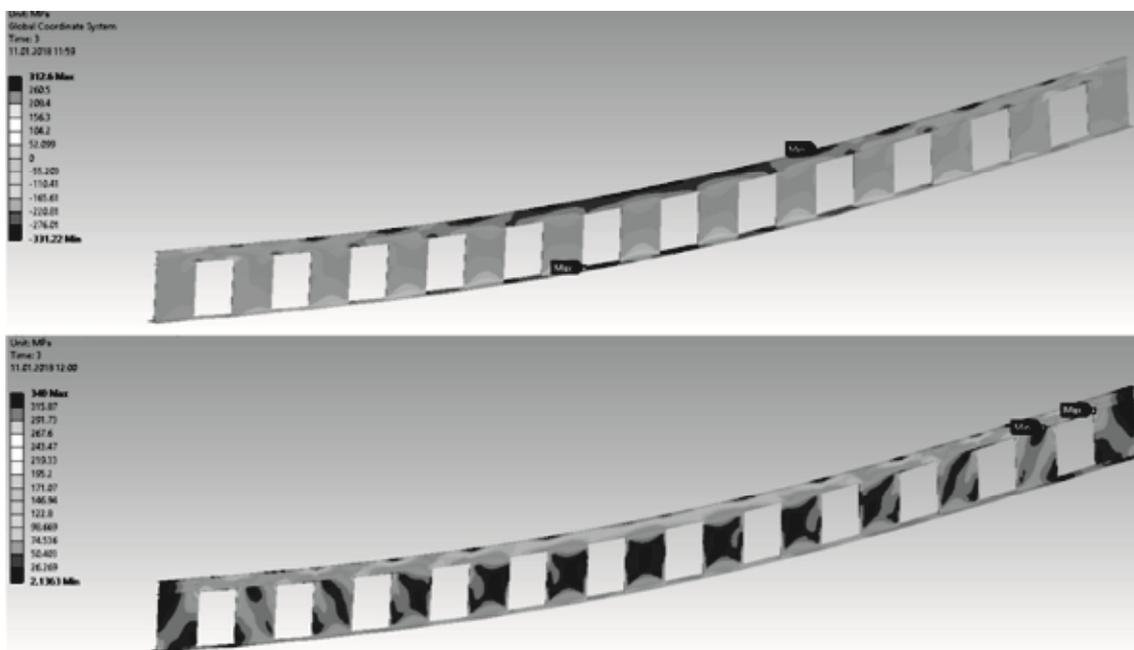


Рис. 6. Нормальные напряжения в балке с оптимально подобранными параметрами:
 а) нормальные напряжения в балке; б) приведенные напряжения в балке

Сравнительный анализ технико-экономических показателей предлагаемых конструктивных решений ПБ с пролетом 18 м и погонной нагрузкой 1000 кг/м приведен в табл. 2.

Таблица 2

Таблица сравнения основных технико-экономических показателей различных типов перфорированных балок в сравнении с базовой двутавровой балкой сплошного сечения

Вид сечения	Высота сечения (см)	Приведенная масса (кг/м)
Двутавр № 45	45	66,5
Перфорированная балка на основе двутавра № 40	60	57,0
Предлагаемая конструкция балки с поясами из проката и стенкой из листовых вставок	77	52,0

Заключение

Известные перфорированные балки [1, 4, 7], изготавливаемые из двутавров, требуют специального технологического оборудования и обладают повышенным расходом стали.

Предлагаемая конструкция перфорированных балок изготавливается при использовании поясов из прокатных элементов, а стенки – из стальных листов и требует меньшего расхода стали на 10-13 %.

Предлагаемые конструкции перфорированных балок требуют дальнейших исследований и разработки инженерной методики их расчета.

Список библиографических ссылок

1. Ганеман Г. А., Кикоть А. А. Анализ металлических балок с перфорированной стенкой // Ползуновский Альманах № 4. т. 2, 2017. С. 49–52.
2. ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings / American Institute of Steel Construction, Chicago, 2016. 620 p.
3. Притыкин А. И., Мисник А. В., Лаврова А. С. Особенности расчета перфорированных балок МКЭ // Известия КГТУ. 2016. № 43. С. 249–259.
4. Rangachari Narayanan, Norire GaraVerni Der-Avanessian Analysis of plate girders with perforated webs Thin-Walled Structures. Vol. 4, Iss. 5, 1986. P. 363–380.
5. Azmi, Mohd Reza & Yatim, M.Y.M. & Esa, A & Wan Badaruzzaman, Wan Hamidon. (2017). Experimental studies on perforated plate girders with inclined stiffeners. Thin-Walled Structures. 117. 247-256. 10.1016/j.tws.2017.04.021
6. Yingjiang, Zhao & Renjun, Yan & Hongxu, Wang. (2015). Experimental and numerical investigations on plate girders with perforated web under axial compression and bending moment. Thin-Walled Structures. 97. 199-206. 10.1016/j.tws.2015.09.017.
7. Vilguts, Aivars & Serdjuks, Dmitrijs & Pakrastins, Leonids & Goremikins, Vadims. (2014). Analysis of perforated web girder load bearing capacity. 198. 10.7250/isconstrs.2014.33.
8. Ahmed S. Elamary Shear Strength Of Plate Girder Web Panel With Opening At Elevated Temperature Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Vol. 37, № 2. P. 281–302.
9. Tong L., Song T., Jiang B., Wang J. (2008). Experimental and numerical study on behavior of steel girders with large web openings. 36. P. 1050–1056.
10. Lee M. (1990). Numerical study of plate girder webs with holes. Ice Proceedings. 89. P. 183–206. 10.1680/iicep.1990.6940.

Kuznetsov Ivan Leonidovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: kuz377@mail.ru

Penkovcev Sergey Aleksandrovich

candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: restavratsija@mail.ru

Gimranov Linur Rafailevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: leenur@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Perforated girders with perforated of steel profiles

Abstract

Problem statement. Perforated girders as structural members of buildings and other structural shapes by their structural form can be assigned in between solid plate girders and lattice structures and can be utilized when large spans need to be covered with moderate or

small loads. The goal of the study is development of new structural shape of the girders with perforated web member which excludes cutting and milling process of solid hot rolled I-beams, requiring no sophisticated equipment or machinery during fabrication process and at the same time accommodating equal stress distribution principle in flange members.

Results. Conducted analysis of production methods and serviceability experience of existing types of perforated girders allowed to ascertain some common disadvantages of that kind of structural shapes: uneven stress distribution between top and bottom flange members and higher linear masses due to discrete nomenclature of proto hot rolled I-beams.

Developed structural shape of girder with perforated web comprised of top and bottom flange members made from hot rolled I beams and plates connected together with discrete web plates. Top flange member is made of hot rolled I-section whereas bottom flange made of hot rolled long plate or tee section. This structural form exclude fabrication stages consisting of cutting and milling and requires no special piece of machinery. The equal stress distribution principle can be achieved in such structural shape by utilizing in flange members higher steel grades of hot rolled I sections and plates. Study asses strength of the developed structural shape of girder and compares its characteristics with those of existing structural forms of perforated beams.

Conclusions. Developed structural shape of perforated girder are tangible for the building construction industry due to projected mass reduction of the girder up to 13 % relatively to existing structural forms of perforated girders with similar initial conditions alongside with simplification of manufacturing process.

Keywords: perforated girder, proto I-section, flanges from hot rolled sections, web discrete plates

References

1. Ganeman G., Kikot A. A. Analysis of steel girders with perforated web member // Polzunovskij Almanah. № 4. t. 2, 2017. P. 49–52.
2. ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings / American Institute of Steel Construction, Chicago, 2016. 620 p.
3. Pritykin A. I., Misnik A. V., Lavrova A. S. Peculiarities in structural FEM analysis of girders with perforated web member// Izvestija KGTU. 2016. № 43. P. 249–259.
4. Rangachari Narayanan, Norire GaraVerni Der-Avanessian Analysis of plate girders with perforated webs Thin-Walled Structures. Vol. 4, Iss. 5. 1986, P. 363–380.
5. Azmi Mohd Reza, Yatim M. Y. M., Esa A., Wan Badaruzzaman, Wan Hamidon. (2017). Experimental studies on perforated plate girders with inclined stiffeners. Thin-Walled Structures. 117. P. 247–256. 10.1016/j.tws.2017.04.021.
6. Yingjiang Zhao, Renjun Yan, Hongxu Wang. (2015). Experimental and numerical investigations on plate girders with perforated web under axial compression and bending moment. Thin-Walled Structures. 97. 199-206. 10.1016/j.tws.2015.09.017.
7. Vilguts Aivars, Serdjuks Dmitrijs, Pakrastins Leonids, Goremikins Vadims. (2014). Analysis of perforated web girder load bearing capacity. 198. 10.7250/isconstrs. 2014. 33.
8. Ahmed S. Elamary Shear Strength Of Plate Girder Web Panel With Opening At Elevated Temperature. Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Vol. 37. № 2. P. 281–302.
9. Tong L., Song T., Jiang B., Wang J. (2008). Experimental and numerical study on behavior of steel girders with large web openings. 36. P. 1050–1056.
10. Lee M. (1990). Numerical study of plate girder webs with holes. Ice Proceedings. 89. P. 183–206. 10.1680/iicep.1990.6940.