

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Научная статья

УДК 691-462; 691.714.018.8; 691-404

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-3/96-101>

Повышение несущей способности балки

Игорь Павлович Попов✉

Курганский государственный университет, Курган, Российская Федерация

✉ uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Отмечено, что наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки. Вместе с тем, из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используют трубчатые балки. Несущая способность двутавровой балки почти вдвое выше, чем трубчатой. Целью настоящей работы является повышение несущей способности трубчатых балок, что позволит расширить ассортимент строительных конструкций. Геометрическое длинномерное тело, боковая поверхность которого имеет прямолинейную образующую, обладает максимальным объемом (при заданной боковой поверхности), если его поперечное сечение имеет форму круга, что соответствует круглой трубе. Трубчатая балка с жидким наполнителем представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью. При нагружении гидравлической балки ее боковая поверхность стремится деформироваться, следовательно внутренний объем трубы стремится к уменьшению. Поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что, в свою очередь, препятствует деформации трубы. В гидравлической балке вся нагрузка благодаря жидкости относительно равномерно распределяется по всей внутренней поверхности балки. Получена оценка, состоящая в пятикратном превышении несущей способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой балкой и в десятикратном по сравнению с трубчатой балкой.

Ключевые слова: трубчатая балка, двутавровая балка, гидравлическая балка, жидкий наполнитель, полость

Для цитирования: Попов И.П. Повышение несущей способности балки // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 3(60). С. 96–101.

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Original article

Increasing the load-bearing capacity of the beam

Igor P. Popov✉

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

✉ uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. It is noted that I-beams have the greatest load-bearing capacity. At the same time, due to the wide distribution and availability of pipe rolling, tubular beams are often used in practice. The load-bearing capacity of an I-beam is almost twice as high as that of a tubular one. The purpose of this work is to increase the load-bearing capacity of tubular beams, which will expand the range of building structures. A geometric long body, the lateral surface of which has a rectilinear generatrix, has a maximum volume (for a given lateral surface) if its cross section has the shape of a circle, which corresponds to a round pipe. A tubular beam with liquid filler is a round pipe plugged at both ends, completely (without air cavities) filled with liquid. When a hydraulic beam is loaded, its side surface tends to deform. Consequently, the internal volume of the pipe tends to decrease. But, since the liquid is incompressible, it does not allow a decrease in volume, which, in turn, prevents the pipe from deforming. In a hydraulic beam, the entire load, thanks to the fluid, is distributed relatively evenly over the entire inner surface of the beam. An estimate was obtained that the load-bearing capacity of

the hydraulic beam is five times greater than that of an I-beam and ten times greater than that of a tubular beam.

Keywords: tubular beam, I-beam, hydraulic beam, liquid filler, cavity

For citation: Popov I.P. Increasing the load-bearing capacity of the beam. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 3(60), pp. 96–101. (In Russ.).

Введение

Наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки [1–3]. Вместе с тем, из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используют трубчатые балки.

Сравнение этих балок по несущей способности следует проводить при условии их равной массы. Для этой цели хорошо подойдет двутавр по ГОСТ Р 57837-2017, масса погонного метра которого составляет 194 кг, и труба по ГОСТ 33228-2015, масса погонного метра которой тоже составляет 194 кг.

Осевой момент сопротивления указанного двутавра равен

$${}^{I-b}W_x = 5625 \text{ см}^3.$$

Осевой момент сопротивления указанной трубы:

$${}^pW_x = 2950 \text{ см}^3.$$

При этом

$$\frac{{}^{I-b}W_x}{{}^pW_x} = \frac{5625}{2950} \approx 1,9.$$

Таким образом, несущая способность двутавровой балки почти вдвое выше, чем трубчатой.

В настоящее время появились патенты [4–6] и журнальные публикации [7–9] о трубобетонных балках, в частности, с преднапряженной нижней частью бетонного ядра. Стальная труба в таких балках играет роль экзoарматуры. Несущая способность трубобетонных балок весьма значительна при их невысокой себестоимости и хорошей технологичности.

Целью настоящей работы является повышение несущей способности трубчатых балок, не с целью конкуренции двутавровым и трубобетонным балкам, а исключительно для расширения ассортимента строительных конструкций и повышения их эксплуатационных свойств.

Материалы и методы

Используется методика геометрической оптимизации и мысленного эксперимента.

Идея использовать жидкий наполнитель для трубчатой балки опирается на известное свойство жидкости – ее практическую несжимаемость.

Геометрическое длинномерное тело, боковая поверхность которого имеет прямолинейную образующую, обладает максимальным объемом (при заданной боковой поверхности), если его поперечное сечение имеет форму круга. Этому условию соответствует круглая труба.

Трубчатая балка с жидким наполнителем (далее – гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью [10].

При нагружении гидравлической балки ее боковая поверхность стремится деформироваться. Следовательно, внутренний объем трубы стремится к уменьшению. Но, поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что, в свою очередь, препятствует деформации трубы.

Если рассмотреть гидравлическую балку, например, прямоугольного сечения, то при нагружении и соответствующем повышении давления жидкость будет стремиться деформировать стенки, вследствие чего прямоугольный профиль будет стремиться трансформироваться в круглый, а площадь профиля будет стремиться к увеличению. Это может привести к недопустимому прогибу балки.

Другими словами, в гидравлической балке прямоугольного сечения уменьшение внутреннего объема, вызванного прогибом, компенсируется увеличением объема, вызванного трансформацией профиля (суммарный объем несжимаемой жидкости остается неизменным). И чем больше прямоугольный профиль будет трансформироваться в круглый, тем больше будет прогиб.

У круглой трубы нет такого «резерва» и возможности для трансформации профиля и увеличения площади поперечного сечения, следовательно, нет и подобного «резерва» увеличения внутреннего объема. Таким образом, исключена и возможность уменьшения внутреннего объема, вызванного прогибом, поскольку суммарный объем жидкости изменяться не может. В идеализированном варианте прогиб круглой гидравлической балки исключается.

Наглядной демонстрацией идеи гидравлической балки может служить простой пример из бытовой практики. Если пустой расправленный матерчатый мешок (аналог балки) положить на два стула (аналог опор), то он под действием собственного веса прогнется и провалится между стульями.

Если этот же мешок плотно заполнить, например, керамзитом и завязать его, то он не только не провалится между стульями, но может выдержать дополнительную существенную нагрузку.

Результаты

Пусть при сверхпредельном нагружении круглой трубчатой балки (не гидравлической), приводящем к выходу ее из строя, пластической деформации подвергается часть поверхности трубы, равная s . Вся площадь поверхности трубы равна S . Сила нагружения равна F^* (сила сосредоточенная, приложена к середине балки под прямым углом к ее оси).

В самом первом приближении, достаточном для предварительной оценки, предельное напряжение в деформированных участках поверхности трубы равно

$$\sigma^* = \frac{F^*}{s}.$$

В гидравлической балке вся нагрузка благодаря жидкости относительно равномерно распределяется по всей внутренней поверхности балки. (Это происходит в соответствии с законом Паскаля – давление, производимое на жидкость или газ, передается в любую точку без изменений во всех направлениях.) При этом давление на внутреннюю поверхность трубы, не беря во внимание площадь концевых заглушек (ввиду грубости приближений), равно

$$p = \frac{F^*}{S}.$$

Из этого очевидным образом следует, что

$$q = \frac{\sigma^*}{p} = \frac{S}{s}.$$

Разумеется, напряжение и давление – это не одно и то же, но они, по крайней мере, имеют одинаковую размерность, поэтому (из их сравнения) *в самом первом приближении* несущая способность гидравлической балки выше, чем у трубчатой в q раз.

Правомерность последней формулы вытекает из того, что в случае пустой трубы под действием внешней сверхпредельной нагрузки разрушается часть поверхности (площадью s), а в случае гидравлической балки – вся поверхность (S), для чего сверхпредельная нагрузка должна быть выше как раз в соответствии с последней формулой.

По некоторым экспертным оценкам при разрушении трубчатой балки пластической деформации подвергается порядка десяти процентов поверхности трубы, или $q \in 10$.

Пусть $q \approx 10$. Это означает, что несущая способность гидравлической балки примерно в десять раз выше, чем у трубчатой, и примерно в пять раз выше, чем у двутаровой.

Обсуждение результатов

В случае плоских концевых заглушек места их сварки с трубой являются сильным концентратором напряжений. В связи с этим, из соображений геометрической оптимизации наилучшей формой концевых заглушек является полусфера.

Полости соседних гидравлических балок в силовой конструкции, например, в пролетном строении моста могут быть выполнены сообщающимися (посредством усиленных патрубков). Это позволяет равномерно перераспределять нагрузку, приложенную к части балок, между всеми гидравлическими балками несущей конструкции.

Действительно, суммарная «рабочая» площадь всех гидравлических (сообщающихся) балок увеличивается кратно количеству балок и давление в балках становится равным

$$p = \frac{F}{nS}, \quad (1)$$

где n – количество сообщающихся гидравлических балок.

Соответственно, в n раз увеличивается несущая способность.

В качестве жидкого наполнителя гидравлических балок во многих случаях следует использовать незамерзающие жидкости.

В целях экономии незамерзающей жидкости внутренние полости гидравлических балок могут частично заполняться твердым дисперсным материалом, например, керамическим ломом, щебнем и т.п.

Заключение

Привлекательность железобетонных балочных конструкций состоит в замещении металла [11, 12]. В этом же состоит привлекательность и рассмотренной гидравлической балки.

Приведенные выше расчеты несущей способности являются грубым приближением.

В случае практического использования гидравлических балок потребуются более обстоятельные инженерные исследования, включая учет площади поверхности концевых заглушек, учет различий между давлением и напряжением (например, смятия), учет упругой деформации стенок, собственного веса жидкости и других факторов.

При этом полученная выше оценка, состоящая в пятикратном превышении несущей способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой и в десятикратном по сравнению с трубчатой может быть скорректирована как в меньшую, так и в большую сторону.

При использовании сообщающихся гидравлических балок можно добиться несопоставимого повышения несущей способности пролетных конструкций (в соответствии с формулой (1)).

Преимущество гидравлической балки над всеми другими типами балок состоит в том, что в отличие от них у гидравлической балки «работает» (в одинаковой мере) весь материал, из которого она изготовлена.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Автор подтверждает ответственность за следующее: разработка концепции и дизайна исследования; сбор данных; анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста.

The author confirms responsibility for the following: study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zheng G., Tian C., Wu J., Guo Z. Ultrasonic stress test of concrete I-beam based on singular value decomposition // Shenyang Jianzhu Gongcheng Xueyuan Xuebao. Ziran Kexue Ban. 2020. Vol. 36, no. 2. P. 212–219. <https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2020.02.03>
2. De'nan F., Hashim N.S. Stress analysis of I-beam with web opening via finite element analysis and experimental study // World Journal of Engineering. 2023. Vol. 20, no. 5. P. 974–988. <https://doi.org/10.1108/wje-11-2021-0627>

3. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н. Оценка локального снижения напряжений в поясах балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 79–85. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/79-85>
4. Парышев Д.Н., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Овчинников И.Г., Харин В.В., Овчинников И.И., Харин А.В., Попов И.П., Воронкин В.А. Патент 2675273 RU, МПК6 E 04 C 3/293, E 01 D 19/00. Трубобетонная балка. № 2017145446; заявл. 22.12.2017; опубл. 18.12.2018, Бюл. № 35.
5. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Мосин А.А., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Харин В.В., Попов И.П., Харин А.В., Воронкин В.А. Патент 2702444 RU, МПК6 E 01 D 2/00. Пролетное трубобетонное строение моста. № 2019103410; заявл. 06.02.2019; опубл. 08.10.2019, Бюл. № 28.
6. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Агафонов Ю.А., Овчинников И.Г., Шеренков В.М., Овчинников И.И., Харин В.В., Харин Д.А., Воронкин В.А. Патент 2739271 RU, МПК6 B04C 3/293. Битрубобетонная балка. № 2019130450; заявл. 25.09.2019; опубл. 22.12.2020, Бюл. № 36.
7. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Моисеев О.Ю., Копырин В.И., Харин В.В., Воронкин В.А. Применение трубобетона в транспортном строительстве // Дорожная держава. 2019. № 90. С. 74–80.
8. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., Харин В.В., Харин Д.А. Трубобетонная балка с содержанием фибры в бетонном ядре // Естественные и технические науки. 2019. № 8. С. 189–195.
9. Овчинников И.Г., Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., Харин В.В., Харин Д.А. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 58–66. <https://doi.org/10.15593/24111678/2019.04.07>
10. Попов И.П., Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Овчинников И.И., Харин В.В., Харин А.В., Воронкин В.А. Патент 2724653 RU, МПК6 E 04 C 3/02, E 01 D 2/00. Гидравлическая балка. № 2019119481; заявл. 20.06.2019; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 21.
11. Томилов С.Н. Особенности деформаций главных балок железобетонных пролетных строений автодорожных мостов при их усилении внешней арматурой // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 3(44). С. 151–158. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-15>
12. Рогатнев Ю.Ф., Минани Ж., Соколов О.О., Хорохордин А.М. Влияние значения процента армирования композитной арматуры на напряженно-деформированное состояние двухслойных изгибаемых бетонных элементов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4 (45). С. 67-75. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-7>

REFERENCES

1. Zheng G., Tian C., Wu J., Guo Z. Ultrasonic stress test of concrete I-beam based on singular value decomposition. *Shenyang Jianzhu Gongcheng Xueyuan Xuebao. Ziran Kexue Ban*, 2020, vol. 36, no. 2, pp. 212–219. <https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2020.02.03>
2. De'nan F., Hashim N.S. Stress analysis of I-beam with web opening via finite element analysis and experimental study. *World Journal of Engineering*, 2023 vol. 20, no. 5, pp. 974–988. <https://doi.org/10.1108/wje-11-2021-0627>
3. Tishkov N.L., Stepanenko A.N. Assessment of local stress reduction in the chords of I-beams with a thin transversely corrugated wall. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*, 2024, no. 1(58), pp. 79–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/79-85>
4. Paryshev D.N., Kopyrin V.I., Moiseev O.Yu., Ovchinnikov I.G., Kharin V.V., Ovchinnikov I.I., Kharin A.V., Popov I.P., Voronkin V.A. Patent 2675273 RU, МПК6 E 04 C 3/293, E 01 D 19/00. Pipe concrete beam. No. 2017145446; application 12/22/2017; publ. 12/18/2018, Bulletin no. 35. (In Russ.).
5. Paryshev D.N., Iltayakov A.V., Kopyrin V.I., Moiseev O.Yu., Mosin A.A., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kharin V.V., Popov I.P., Kharin A.V., Voronkin V.A. Patent 2702444 RU, МПК6 E 01 D 2/00. Span pipe-concrete bridge structure. No. 2019103410; application 02/06/2019; publ. 10/08/2019, Bulletin no. 28. (In Russ.).
6. Paryshev D.N., Iltayakov A.V., Kopyrin V.I., Moiseev O.Yu., Agafonov Yu.A., Ovchinnikov I.G., Sherenkov V.M., Ovchinnikov I.I., Kharin V.V., Kharin D.A., Voronkin V.A. Patent 2739271 RU, МПК6 B04C 3/293. Bitrube-concrete beam. No. 2019130450; application 09/25/2019; publ. 12/22/2020, Bulletin no. 36. (In Russ.).

7. Paryshev D.N., Iltyakov A.V., Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Moiseev O.Yu., Kopyrin V.I., Kharin V.V., Voronkin V.A. Application of pipe concrete in transport construction. *Road Power*, 2019, no. 90, pp. 74–80. (In Russ.).
8. Paryshev D.N., Iltyakov A.V., Moiseev O.Yu., Kharin V.V., Kharin D.A. Tube-concrete beam with fiber content in the concrete core. *Natural and technical sciences*, 2019, no. 8, pp. 189–195. (In Russ.).
9. Ovchinnikov I.G., Paryshev D.N., Iltyakov A.V., Moiseev O.Yu., Kharin V.V., Kharin D.A. Increasing the load capacity of a pipe-concrete beam. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2019, no. 4, pp. 58–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/24111678/2019.04.07>
10. Popov I.P., Paryshev D.N., Iltyakov A.V., Kopyrin V.I., Moiseev O.Yu., Ovchinnikov I.I., Kharin V.V., Kharin A.V., Voronkin V.A. Patent 2724653 RU, MPK6 E 04 C 3/02, E 01 D 2/00. Hydraulic beam. No. 2019119481; application 06/20/2019; publ. 06/25/2020, Bulletin no. 21. (In Russ.).
11. Tomilov S.N. Features of deformations of the main beams of reinforced concrete superstructures of road bridges when they are reinforced with external reinforcement. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*, 2020, no. 3 (44), pp. 151–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-15>
12. Rogatnev Yu.F., Minani Zh., Sokolov O.O., Khorokhordin A.M. Influence of the percentage of reinforcement of composite reinforcement on the stress-strain state of two-layer bendable concrete elements. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*, 2020, no. 4(45), pp. 67–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-7>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Игорь Павлович – кандидат технических наук, доцент, Курганский государственный университет (Курган, Российская Федерация)

✉ uralakademia@kurganstalmost.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8683-0387>

Igor P. Popov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kurgan State University (Kurgan, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 23.08.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 06.09.2024.

Принята к публикации / Accepted: 20.09.2024.