

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.21.012.45

*БОРОВИКОВ АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
diamos@mail.ru*

*БОРОВИКОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА, магистрант,
diamos@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК СО СКВОЗНОЙ СТЕНКОЙ

В статье рассмотрены вопросы по оценке напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок со сквозной стенкой. Численное моделирование сталежелезобетонного пролетного строения выполнено стандартными средствами программного комплекса ЛИРА 9.0. Получены результаты напряженно-деформированного состояния расчетных моделей стальных и сталежелезобетонных балок со сквозной стенкой. Выполнен анализ полученных результатов с обоснованием целесообразности применения таких конструкций в пролетных строениях автодорожных мостов. Вывод: железобетонная плита проезжей части, включенная в совместную работу на изгиб, положительно влияет на распределение нормальных напряжений по высоте сечения и увеличивает как несущую способность, так и жесткость.

Ключевые слова: сталежелезобетонная балка; пролетное строение; напряженно-деформированное состояние; численные методы.

*ALEKSANDR G. BOROVIKOV, PhD, A/Professor,
diamos@mail.ru*

*NATALYA A. BOROVIKOVA, Undergraduate Student,
diamos@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

EVALUATION OF STRESS-STRAIN STATE OF OPEN-WEB COMPOSITE BEAMS

The paper deals with the evaluation of the stress-strain state of composite open-web beams. Numerical modeling of the composite superstructure is performed by 9.0. Lear software. The results are presented for the stress-strain state of steel and composite open-web beam model. The obtained results are analyzed with the opportunity of using these structure in the highway bridge spans. The concrete beam in the highway involved in flexural strength has a positive effect on the distribution of normal stresses along the section height and increases both the load-bearing capacity and stiffness.

Keywords: reinforced concrete beam; span; stress-strain state, numerical methods.

Стальные двутавровые балки со сквозной стенкой успешно применяются в металлических конструкциях в практике отечественного и зарубежного промышленного строительства с середины прошлого столетия [1, 2].

В основу предыдущих исследований напряженно-деформированного состояния стальных и сталежелезобетонных балок со сквозной стенкой заложены расчетные модели составного стержня с упругими связями или безраскосной фермы Виренделя [3], что связано с решением статически неопределимых задач различными методами строительной механики или теории упругости.

Многолетний опыт теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металлических балок со сквозной стенкой, опыт реального применения в промышленном строительстве, технологии их индустриального изготовления убедительно подтверждают экономическую эффективность и надежность таких конструкций, а также целесообразность их применения в пролетных строениях мостов [4–6].

Наряду с этим в недостаточной степени решены вопросы исследования статической работы стальных балок со сквозной стенкой, объединенных для совместной работы с железобетонной плитой проезжей части (сталежелезобетонных балок), и обоснованности их применения в пролетных строениях мостов.

Исследования напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок со сквозной стенкой выполнены на численной модели сталежелезобетонного пролетного строения. Пролетное строение состоит из двух стальных главных балок со сквозной стенкой, объединенных для совместной работы с железобетонной плитой проезжей части (рис. 1).

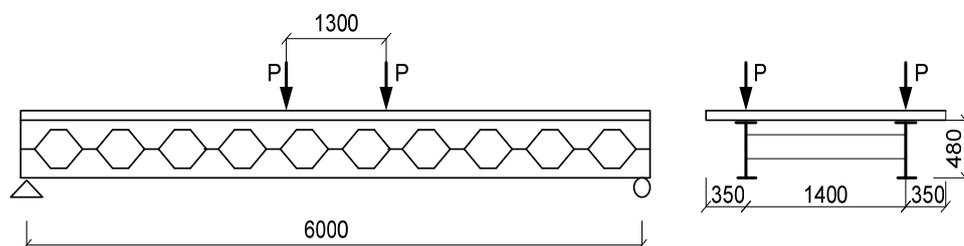


Рис. 1. Конструкция модели сталежелезобетонного пролетного строения и схема нагружения

Главные балки изготовлены путем распуска прокатного профиля двутавровой балки 30Б1 и развития до высоты 480 мм из стали марки 16Д. В опорных сечениях и в середине пролета балки объединены поперечными связями из швеллера № 20.

Численное моделирование сталежелезобетонного пролетного строения выполнено в два этапа.

На первом этапе моделирования с помощью стандартных средств ПК ЛИРА была сгенерирована расчетная схема стальной части пролетного строения, состоящая из двух главных балок со сквозной стенкой и поперечных связей. Пространственная конструкция пролетного строения выполнена стандартными средствами генерации расчетной схемы (балка-стенка и плита) ПК ЛИРА. Балки со сквозной стенкой моделированы квадратными пластинами с размерами 60×60 мм. В соединениях стенок с нижним и верхним поясами добавлены пластины квадратного сечения 8×8 мм. Балки соединены связями – три стержня КЭ-10 (универсальный пространственный стержень) (рис. 2).

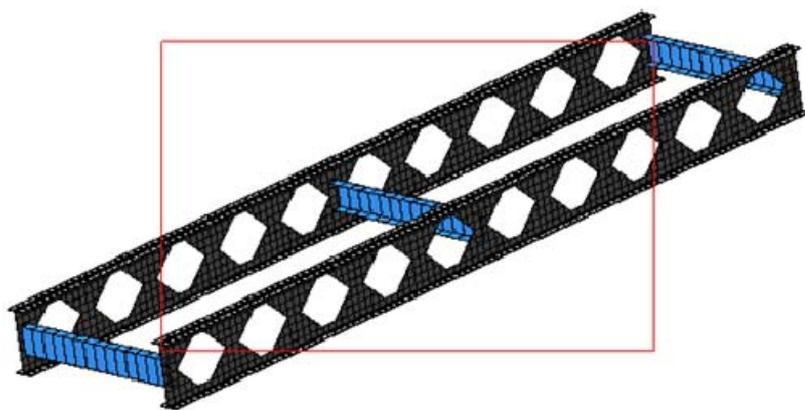


Рис. 2. Расчетная модель стальной части пролетного строения

На втором этапе создана расчетная модель сталежелезобетонного пролетного строения, состоящая из двух главных балок со сквозной стенкой, поперечных связей, поддона в виде металлического листа толщиной 5 мм, упоров в виде поперечных ребер из уголков $63 \times 63 \times 5$ мм и железобетонной плиты из бетона класса В35. Модель сгенерирована как плита и балка-стенка из прямоугольных КЭ-41 с сеткой дискретизации, соответствующей сетке верхних поясов балок. Упоры – стержнями из встроенной в ПК ЛИРА библиотеки сортамента, которые соединены с поддоном металлическими стержнями длиной 50 мм и диаметром 5 мм в шахматном порядке по всей поверхности поддона. Железобетонная плита сгенерирована толщиной 100 мм с сеткой дискретизации, соответствующей сетке поддона и упоров, из прямоугольных пластин КЭ-41 с генерацией сетки из арматуры диаметром 6 мм и размером ячейки 200×200 мм (рис. 3).

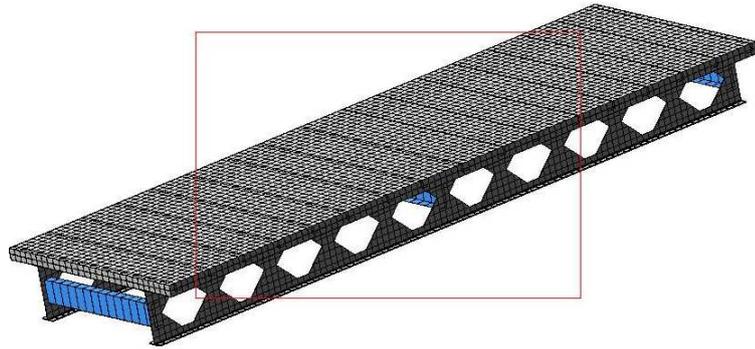


Рис. 3. Расчетная модель сталежелезобетонного пролетного строения с балками со сквозной стенкой

Для оценки напряженно-деформированного состояния расчетные модели стального (тип I) и сталежелезобетонного (тип II) пролетного строения загружались сосредоточенными силами $P = 12$ тс, приложенными в средней части пролета (см. рис. 1).

На рис. 4 представлены результаты расчетов в виде мозаик нормальных напряжений в расчетных моделях стального и сталежелезобетонного пролетных строений.

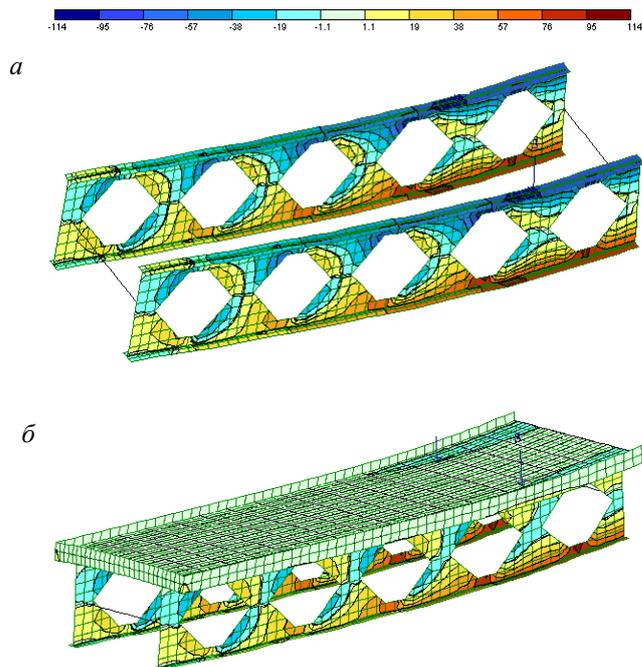


Рис. 4. Изополя нормальных напряжений в балках модели:
a – стальной части сталежелезобетонного пролетного строения (тип I); *б* – сталежелезобетонного пролетного строения (тип II)

Положительные значения напряжений окрашены в палитру цветов от светло-желтого до темно-коричневого. Отрицательные значения соответствуют областям сжатия и окрашиваются в палитру от бирюзового до темно-синего цвета.

Максимальные нормальные напряжения сконцентрированы в 1/4 пролета и достигают максимального значения 213 МПа в металлической модели и 167 МПа в сталежелезобетонной модели. Нормальные напряжения от собственного веса конструкции составляют 4,6 % от значения напряжений, создаваемых расчетной нагрузкой 12 т для металлической модели и 21,6 % – для сталежелезобетонной модели.

Неоднородность нормальных напряжений снижается в середине пролета балок до 116 МПа – нижнем поясе середины балки для сталежелезобетонной модели и 135 МПа – для металлической модели.

Нормальные напряжения от собственного веса конструкции составляют 9,3 % от значения напряжений, создаваемых расчетной нагрузкой 12 т для металлической модели и 36 % – для сталежелезобетонной модели. Неоднородность поперечных напряжений минимальна в середине балки.

Максимальные касательные напряжения сконцентрированы в опорном сечении и в 1/4 пролета, достигая максимальных значений 61–74 МПа в сталежелезобетонной модели и 71–83 МПа в металлической модели. При этом касательные напряжения от собственного веса конструкции составляют 6,8 % от значения напряжений, создаваемых расчетной нагрузкой 12 т для металлической модели и 27 % – для сталежелезобетонной модели.

Продольные и поперечные напряжения в железобетонной плите сталежелезобетонной модели максимальны в опорном сечении и достигают значений 9,1 и 6,1 МПа соответственно.

Обобщенные результаты расчета напряженно-деформированного состояния численных моделей стальной балки (тип I) и сталежелезобетонной балки (тип II) при нагрузке $P = 12$ тс представлены в таблице.

Так как балки расчетной численной модели загружаются двумя сосредоточенными силами, расположенными в средней части пролета, то в этом месте образуется зона чистого изгиба. Пятые от краев балки отверстия, расположенные симметрично от середины пролета, попадают в зону чистого изгиба, что объясняет равенство прогибов и основных нормальных напряжений в крайних точках сечений.

Максимальные значения нормальных напряжений в середине пролета балки в верхней и нижней полках модели тип I составили 114 МПа, симметричны относительно оси балки и отличаются только знаками (положительное значение соответствует растяжению). Стальная балка со сквозной стенкой геометрически симметрична, и распределение нормальных напряжений соответствует гипотезе плоских сечений. Наблюдается концентрация напряженного состояния в нижней части стенки под пятыми отверстиями от краев балки. Значение нормальных напряжений в этом месте достигает величины 114 МПа.

Максимальные значения нормальных напряжений в середине пролета балки модели тип II составили: в нижней полке – 107 МПа; в верхней полке – 18 МПа, что объясняется геометрической асимметрией сталежелезобетонного

сечения. Коэффициент асимметрии сталежелезобетонного сечения по нормальным напряжениям составляет 0,168. Также наблюдается концентрация напряженного состояния в нижней части стенки под пятым от края балки отверстием, расположенным недалеко от середины балки. Значение нормальных напряжений в этом месте достигает величины 107 МПа.

Таблица 1

**Результаты расчета численной модели
сталежелезобетонного пролетного строения**

Тип модели	Расположение сечения	Значения параметров расчетных данных			
		Прогиб, мм	Нормальные напряжения в нижней полке	Нормальные напряжения в верхней полке	Нормальные напряжения во вставке нижней полки в нижней части отверстия
I	Середина пролета	8,6	114	-114	71
	Пятое отверстие от края балки		114	-114	114
II	Середина пролета	4,6	107	-18	89
	Пятое отверстие от края балки		107	-18	107

Следует отметить, что при одинаковом нагружении расчетных моделей сосредоточенной нагрузкой $P = 12$ тс уровень напряженного состояния сталежелезобетонной балки уменьшился по сравнению со стальной. Максимальные нормальные напряжения в нижней полке балки со сквозной стенкой уменьшились на 7 МПа (6 %), а в верхней полке – на 96 МПа (84 %). Железобетонная плита проезжей части, объединенная для совместной работы с металлической балкой, не только значительно разгружает верхний пояс последней, но и уменьшает напряженное состояние сечения в целом.

В соответствии с результатами расчета жесткость сталежелезобетонной модели тип II на 46,5 % выше, чем у модели без железобетонной плиты проезжей части.

Выполненные численные исследования напряженно-деформированного состояния расчетных моделей стальных и сталежелезобетонных балок со сквозной стенкой позволяют сделать вывод: железобетонная плита проезжей части, включенная в совместную работу на изгиб, положительно влияет на распределение нормальных напряжений по высоте сечения и увеличивает как несущую способность, так и жесткость сечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Холопцев, В.В.* К расчету балок из разрезных прокатных двутавров по теории составных стержней / В.В. Холопцев // Сб. научн. тр. «Судостроение и судоремонт». – Одесса : Одесский институт инженеров морского флота, 1968. – Вып. 2. – С. 17–27.
2. *Gibson, J.E.* An investigation of the stress and deflections in castellated beams / J.E. Gibson, B.S. Jenkins // *Structural Engineer*. – London, 1957. – V. 35. – № 12. – P. 467–479.
3. *Данков, В.С.* Рациональные конструкции металлических сквозных балок / В.С. Данков, М.Д. Корчак, В.Н. Ворожбянов // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1989. – № 9. – С. 19–24.
4. *Картопольцев, В.М.* О применении перфорированных балок в сталежелезобетонных пролётных строениях мостов / В.М. Картопольцев, Б.Г. Акимов // Тезисы докладов 3-й Украинской научно-технической конференции «Перспективы развития и пути повышения эффективности применения лёгких и особо лёгких металлических конструкций». – Киев. – 1984. – С. 99–100.
5. *Картопольцев, В.М.* Некоторые аспекты применения и экспериментального исследования сквозных балок / В.М. Картопольцев, В.С. Данков // Исследование транспортных сооружений Сибири. – Томск : Изд-во ТГУ, 1987. – С. 12.
6. *Боровикова, Н.А.* К вопросу об исследовании статической работы сталежелезобетонных балок со сквозной стенкой / Н.А. Боровикова // Актуальные проблемы современной науки. Международная научно-практическая конференция 13–14 декабря 2013 г. Часть 4. – Уфа : РИЦ БашГУ. – С. 90–93.

REFERENCES

1. *Holoptsev V.V.* K raschetu balok iz razreznykh prokatnykh dvutavrov po teorii sostavnykh sterzhnei [Computation of rolled I-beams by the theory of composite bars]. Sb. nauchn. tr. 'Sudostroenie i sudoremont'. 1968. V. 2. Pp.17–27.(rus)
2. *Gibson J.E., Jenkins B.S.* An investigation of the stress and deflections in castellated beams / *Structural Engineer*. London. 1957. V. 35. No. 12. Pp. 467–479.
3. *Dankov B.C., Korczak M.D., Vorozhbyanov V.N.* Ratsional'nye konstruksii metallicheskih skvoznykh balok [Rational design of open-web metal beams]. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1989. No. 9. Pp. 19–24. (rus)
4. *Kartopol'tsev V.M., Akimov B.G.* O primeneniі perforirovannykh balok v stalezhelezobetonnnykh prole'tnykh stroeniyakh mostov [Application of perforated beams in reinforced concrete bridge spans]. *Proc. 3rd Ukr. Sci. Conf. 'Prospects of development and ways to improve the efficiency of light and super light metal structures'*. Kiev. 1984. Pp. 99–100. (rus)
5. *Kartopol'tsev V.M., Danko V.S.* Nekotorye aspekty primeneniya i eksperimental'nogo issledovaniya skvoznykh balok [Some aspects of application and experimental study of cross-beams]. *Issledovanie transportnykh sooruzhenii Sibiri*. Tomsk : TSU Publ., 1987. 12 p. (rus)
6. *Borovikova N.A.* K voprosu ob issledovanii staticheskoi raboty stalezhelezobetonnnykh balok so skvoznou stenкой [Study of static work of composite open-web beams]. *Proc. Int. Sci. Conf.* 2013. Pt. 4. Pp. 90–93. (rus)