

6. Nielsen, M.P. Limit Analysis and Concrete Plasticity / M.P. Nielsen // Prentice-Hall. – Englewood Cliffs, N.J., 1984.
7. Ramirez, J.A. Evaluation of a Modified Truss-Model Approach for Beams in Shear / J.A. Ramirez, J.E. Breen // ACI Structural Journal. – Sept.-Oct., 1991. – V. 88. – No. 5. – P. 562–571.
8. Kani, G.N.J. The Riddle of Shear Failure and its Solution / G.N.J. Kani // ACI JOURNAL, Proceedings. – 1964. – V. 61. – No. 4. – Sept.-Oct. – P. 441–467.
9. Reineck, K.-H. Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members without Transverse Reinforcement Derived from a Mechanical Model / K.-H. Reineck // ACI Structural Journal. – 1991. – Sept.-Oct. – V. 88. – No. 5. – P. 592–602.
10. Walraven, J.C. Aggregate Interlock: A Theoretical and Experimental Analysis / J.C. Walraven // PhD thesis, Delft University. – The Netherlands, 1980.
11. Mitchell, D. Diagonal Compression Field Theory – A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion / D. Mitchell, M. P. Collins // ACI JOURNAL, Proceedings. – 1974. – V. 71. – P. 396–408.
12. Vecchio, F. J. M. P. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear / F.J. Vecchio, M.P. Collins // ACI JOURNAL, Proceedings. – 1986. – V. 83. – No. 2. – Mar.-Apr. – P. 219–231.
13. Pang, X.-B. D. Behavior of Reinforced Concrete Membrane Elements in Shear / X.-B. D. Pang, T. T. C. Hsu // ACI Structural Journal. – 1995. – Nov.-Dec. – V. 92. – No. 6. – P. 665–679.
14. Pang, X.-B. D. Fixed-Angle Softened-Truss Model for Reinforced Concrete / X.-B. D. Pang, T. T. C. Hsu // ACI Structural Journal. – 1996. – Mar.-Apr. – V. 93. – No. 2. – P. 197–207.
15. Schlaich, Towards a Consistent Design of Structural Concrete / J. Schlaich, I. Schäfer, M. Jennewein // Journal of the Prestressed Concrete Institute. – 1987. – V. 32. – No. 3. – P. 74–150.

УДК 624.012.36

Малиновский В.Н., Матвеевко Н.В.

ЭФФЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ДВУСКАТНЫХ СТРОПИЛЬНЫХ БАЛОК

Введение

Железобетонные стропильные балки являются одним из основных видов несущих элементов плоскостных покрытий одноэтажных промышленных зданий при пролетах 12 и 18 м и шаге 6 м. Среди многообразия применяющихся типовых и экспериментальных стропильных балок наиболее распространены балки трапециевидального очертания с единым уклоном верхней грани от конька со сплошной стенкой и с отверстиями в стенке (условно называемыми решетчатыми балками). Решетчатые двускатные балки применяются для покрытий зданий при тех же условиях, что и со сплошной стенкой. Основным достоинством решетчатых стропильных балок является более простая форма опалубки и меньшая трудоемкость изготовления. Но наряду с определенными достоинствами решетчатые балки менее экономичны в сравнении с балками со сплошной стенкой по расходу арматуры приблизительно на 15%, по расходу бетона – на 13%.

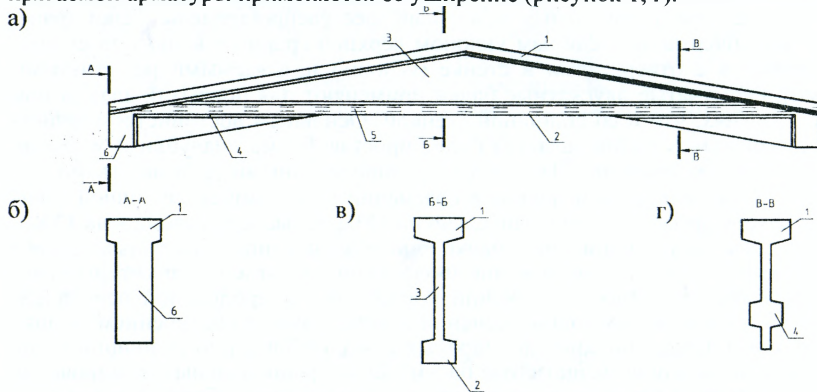
Изготавливаются стропильные балки одноэтажных промышленных зданий преднапряженными [1]. При помощи продольной напрягаемой арматуры обеспечивается трещиностойкость сечений нормальных к продольной оси балки. Трещиностойкость же наклонных сечений обеспечивается увеличением толщины стенки в приопорной зоне двутавровых сечений (балки со сплошной стенкой) или по всей длине (решетчатые балки). Более рациональным армированием балок считается расположение арматуры по траектории, близкой к траектории главных растягивающих напряжений, которая, как известно, в балочных конструкциях из нижней зоны в пролете балки перемещается к верхней грани на опорах. Однако криволинейное расположение напрягаемой арматуры со-

пряжено с повышенной трудоемкостью работ по натяжению арматуры и необходимостью наличия приспособлений, обеспечивающих натяжение арматуры в отогнутом положении или оттяжку ее из первоначального горизонтального положения в просктное отогнутое. Наиболее успешно данный вопрос решается в балках с ломаной нижней гранью [2, 3, 4]. В таких балках прямолинейная предварительно напрягаемая арматура располагается в нижней зоне сечения в пролете и под пологим отгибом по отношению к продольной оси балки в опорных зонах (рисунок 1). Это обеспечивает трещиностойкость нормальных сечений в средней части пролёта балки и наклонных сечений в опорных зонах.

Кроме того, охватывающий всю зону действия поперечных сил пологий перевод некоторого количества арматуры из нижней (растянутой) зоны в верхнюю улучшает технико-экономические показатели конструкции, прежде всего за счет снижения расхода арматуры на ортогональное поперечное армирование в виде хомутов и поперечных стержней.

Конструктивное решение

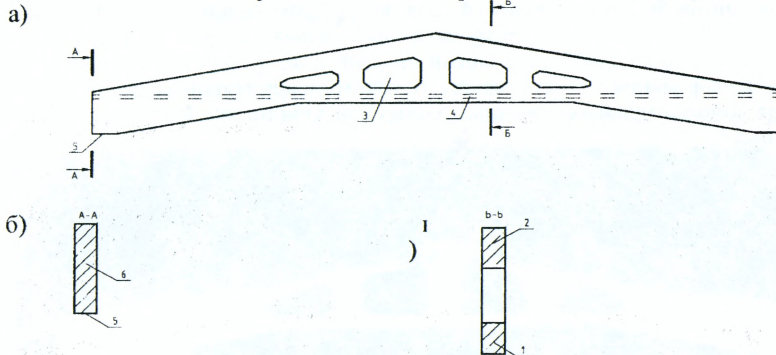
Авторами статьи разработан усовершенствованный вариант конструктивного решения двускатных балок, в котором при сохранении основных конструктивных параметров балки: высота на опоре 800, 900 мм, высота в середине пролета $1/10 \div 1/15$ пролета, принимая прямолинейное очертание продольной напрягаемой арматуры, удалось добиться сохранения тех же преимуществ, которыми обладают балки с отогнутой арматурой. Заключается это решение в необходимости увеличения уклона верхней грани двускатной балки до $1/6 \div 1/7$ пролета и излома нижней грани таким образом, чтобы в опорной зоне длиной $1/3 \div 1/4$ пролета верхняя и нижняя грани балок были параллельны (рисунок 1, 2). В средней части пролета балка сохраняет очертание двускатной балки. Вследствие этого в опорной зоне прямолинейно направленная напрягаемая арматура располагается под пологим отгибом к продольной оси опорной части балки и, таким образом, ее траектория соответствует переводу (отгибу) арматуры из нижней зоны сечения в пролете в верхнюю на опорах. Сечение балки со сплошной стенкой в средней зоне пролета сохраняется двутавровым (рисунок 1, в), а в опорной – тавровым с той же шириной, но в местах трассировки напрягаемой арматуры применяется ее уширение (рисунок 1, г).



а) общий вид балки; б) разрез А-А; в) разрез Б-Б; г) разрез В-В
 1) верхняя полка; 2) нижняя полка; 3) стенка; 4) продольные ребра полки;
 5) предварительно напряженная арматура; 6) опорная стойка

Рисунок 1 – Двускатная железобетонная балка со сплошной стенкой

В решетчатых балках (рисунок 2) сечение остается по всей длине прямоугольным постоянной ширины (рисунок 2, б, в), но вследствие повышения трещиностойкости нормальных и наклонных сечений при помощи прямой продольной арматуры возникает возможность уменьшить толщину балок и тем самым снизить расход бетона по сравнению с типовым решением.



а) общий вид балки; б) разрез А-А; в) разрез Б-Б
 1) верхний пояс; 2) нижний пояс; 3) отверстия; 4) предварительно напряженная арматура; 5) площадка опирания; 6) прямоугольное сечение
 Рисунок 2 – Двускатная решетчатая железобетонная балка

Кроме вышесотмеченных преимуществ, связанных с переводом напрягаемой арматуры из нижней зоны в верхнюю в пределах всего пролета среза, применение предложенного варианта конструктивного решения стропильных балок может положительно сказываться на объемно-планировочных решениях, эксплуатационных качествах и экономических показателях одноэтажных производственных зданий:

1. В пространстве образованном изломом нижней грани балки удаётся разместить подвесное подъёмно-транспортное оборудование, что может привести к уменьшению строительной высоты здания и тем самым снизить расход материалов на вертикальное ограждение объекта.

2. Вследствие излома нижней грани предполагаемого варианта балки выпуклостью вверх увеличивается полезная площадь поперечного сечения пролёта здания и создаются благоприятные эстетички-психологические впечатления из-за кажущейся вспарушенности покрытия.

3. Вследствие вынужденного увеличения уклона верхней грани балки (уклон 1/6-1/7 пролета) согласно установившейся классификации кровля здания из категории малоуклонной становится скатной, при которой эффективнее решается водоотведение осадков и улучшаются эксплуатационные качества гидроизоляционного слоя кровли.

4. В балках со сплошной стенкой удаётся достичь уменьшения расхода бетона на 10,6% и арматуры на 8,2%, а в решетчатых балках на 15% и 5% соответственно.

Напряженно-деформированное состояние

В компьютерной среде MSC.Nastran авторами была сделана попытка создания расчетной схемы железобетонной двускатной балки с ломаным нижним поясом. В качестве продольного армирования балки было принято три преднапряженных каната диаметром 15 мм.

Для построения конечно-элементной трехмерной модели применено твердотельное моделирование с использованием конечных элементов (КЭ) «Solid». Разбивка конечно-элементной модели осуществлялась в продольном и поперечном направлениях. Предварительный анализ моделирования балки выявил необходимость прибегнуть к частой сетке конечных элементов с размерами, не превышающими 50 мм по бетону (4 слоя по толщине балки, более 33 000 узлов и более 32 000 КЭ), которая к тому же в наибольшей степени отражает геометрические особенности балки (ломаный нижний пояс, отверстия в стенке балки, наличие армирования). Связь между бетоном и арматурой принималась без введения дополнительных конечных элементов. Общий вид КЭ модели показан на рисунке 3.

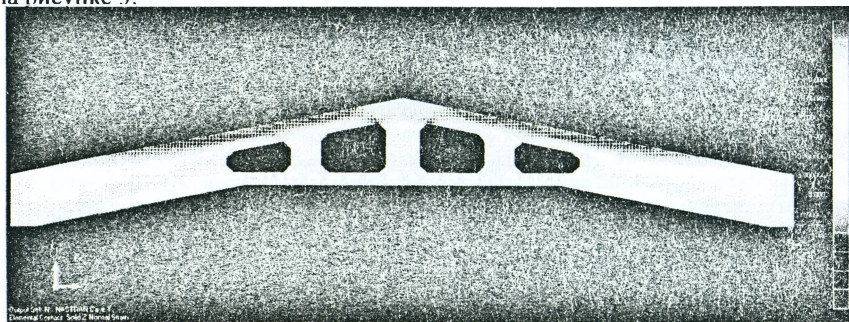


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель балки с изополями продольных деформаций

Анализ напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции производился по величине деформаций, возникающих как в сжатой, так и в растянутой зоне бетона и в арматуре при различных нагружениях (рисунок 3). Результаты расчетов и их анализ свидетельствуют о том, что напряженно-деформированное состояние предложенного варианта конструктивного решения балки соответствует общим закономерностям работы конструкции по балочной схеме, а также выявили, что опасным по прочности сечением, нормальным к продольной оси, является сечение в месте излома нижней грани балки

Не меньший интерес представляет полученное напряженно-деформированное состояние бетона на участках между нормальными трещинами.

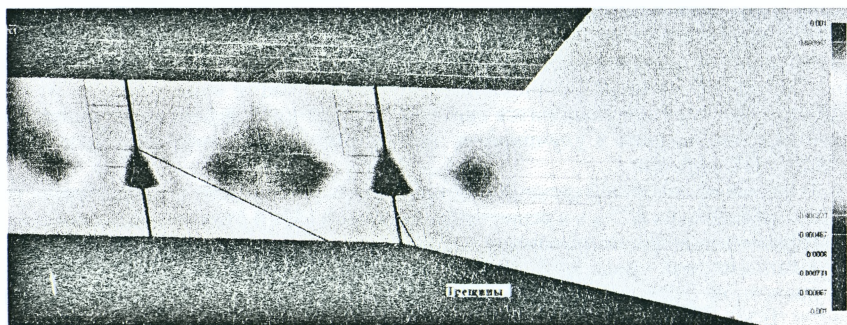


Рисунок 4 – Деформации в бетоне балки на участке между трещинами

Из рисунка 4 четко прослеживается постепенное вовлечение арматурой в работу бетона растянутой зоны от сечения с трещиной до сечения в середине длины между трещинами. Данное обстоятельство давно используется при рассмотрении процессов трещинообразования бетона и заложено в теории расчета железобетона многими авторами [6, 7].

Выводы

1. Предлагаемое конструктивное решение двускатной балки позволяет при прямолинейной напрягаемой арматуре повысить трещиностойкость как нормальных, так и наклонных к продольной оси сечений. При этом также положительно решаются вопросы объемно-планировочных параметров здания и эксплуатационные условия кровли.

2. При применении двускатной балки с прямолинейной напрягаемой арматурой и ломаным нижним поясом удается достичь снижения расхода как бетона, так и арматуры. Усовершенствованный вариант стропильной балки со сплошной стенкой имеет лучшие экономические показатели по расходу стали на 8,2%, расходу бетона – на 10,6%, решетчатой балки на 5% и 15% соответственно.

3. В результате численного моделирования напряженно-деформированного состояния железобетонной балки с ломаной нижней гранью получены качественные картины распределения напряжений и деформаций в бетоне и арматуре как до появления, так и после появления трещин, а также в локальных зонах между нормальными трещинами.

4. Двускатные балки с усовершенствованным вариантом конструктивного решения могут применяться в качестве основных несущих конструкций производственных зданий промышленного и сельскохозяйственного назначения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леонгардт, Ф. Предварительно напряженный железобетон. – М.: Стройиздат, 1983. – 245 с.
2. Малиновский, В.Н. Усовершенствованный вариант конструктивного решения железобетонных стропильных балок / В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий, Н.В. Матвеевко // Вестник БрГТУ 2013: сб. науч. ст. – Брест: БрГТУ, 2013. – С. 128–132.
3. Двускатная стропильная балка: пат. 9507 Респ. Беларусь, МПК Е 04В 1/06 / В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий, Н.Н. Шалобьга; заявитель УО «Брест. гос. техн. ун-т» № u 20130180; заявл. 25.02.2013; опубл. 30.08.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 4(93). – С. 237.
4. Решетчатая стропильная балка: пат. 10178 Респ. Беларусь / В.Н. Малиновский, Н.В. Матвеевко, П.В. Кривицкий; заявитель УО «Брест. гос. техн. ун-т» № u2013.09.14 заявл. 11.11.2013; опубл. 30.06.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3(98).
5. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с пологим отгибом части продольной предварительно напряженной арматуры / Н.Н. Шалобьга, В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий // Вестник БрГТУ. – 2010. – № 1(61): Строительство и архитектура. – С. 78–81.
6. Гвоздев, А.А. О некоторых направлениях в теории деформирования и длительной прочности бетона // Прочностные и деформационные характеристики элементов бетонных и железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 42–47.
7. Мурашев, В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. – М.: Стройиздат, 1950. – 268 с.