

Малиновский В.Н., Кривицкий П.В., Матвеев Н.В.

Железобетонные стропильные балки вследствие простой схемы опирания и предсказуемости напряженно-деформированного состояния являются одним из основных видов несущих элементов плоских и малоуклонных покрытий одноэтажных производственных зданий. Наибольшее распространение получили стропильные балки пролетами 12 и 18 м при шаге 6 м. В свою очередь в практике строительства производственных зданий можно встретить балки пролетами 15, 24 и даже 30 м.

Выбор стропильной конструкции зависит от объемно-планировочных и конструктивных решений, условий строительства с учетом их технико-экономической целесообразности. Установлено, что при пролетах до 18 м включительно балки покрытий по материалоемкости и трудоемкости изготовления оказываются экономически оправданными по сравнению с фермами.

Среди многообразия применяющихся типовых и экспериментальных стропильных балок можно выделить следующие типы: трапециевидного очертания; полигональные с ломаным очертанием верхней полки и с криволинейным очертанием верхней полки или так называемые «арочные»; для односкатных покрытий применяются балки постоянной высоты и с ломаным очертанием нижней полки; для плоских покрытий – постоянной высоты с параллельными поясами. При этом поперечное сечение балок может быть тавровым, двутавровым или прямоугольным. Различают балки сплошные (со сплошной стенкой) и с отверстиями в стенке (условно называемые решетчатыми балками).

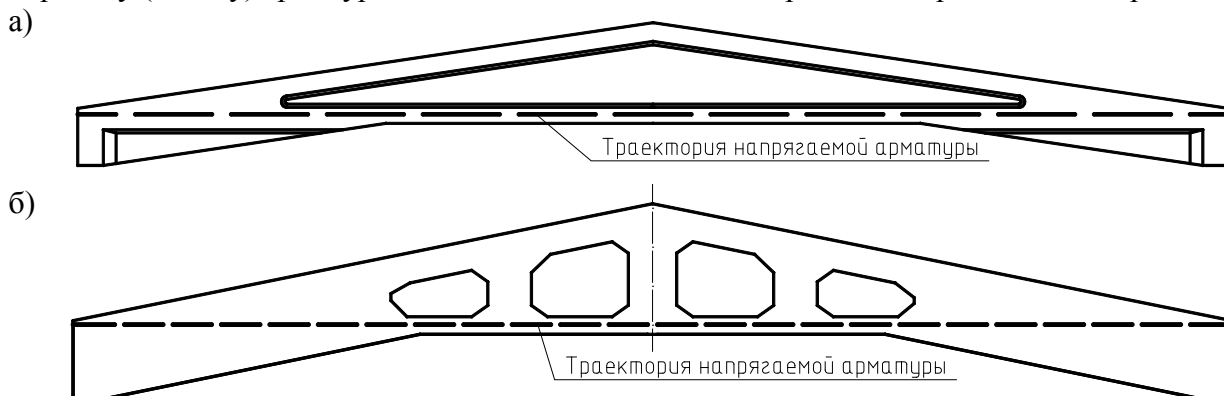
Для снижения материалоемкости, повышения экономической эффективности и долговечности стропильные балки одноэтажных промышленных зданий изготавливаются предварительно напряженными. Применение прямолинейной продольной напрягаемой арматуры обеспечивает повышение трещиностойкости сечений нормальных к продольной оси балки, в то же время трещиностойкость наклонных сечений остается практически без изменений. Обжатие бетона по длине конструкций позволяет использовать материалы более высоких классов, что способствует уменьшению размеров поперечного сечения при одинаковом уровне нагрузки, либо повысить несущую способность конструкции без изменения её размеров.

Повышение экономической эффективности и долговечности железобетонных конструкций достигается не только постоянным улучшением механических и физических свойств материалов, но и внедрением новых конструктивных и технологических решений. Использование в предварительно напряженных железобетонных конструкциях рационального расположения эффективных видов арматуры позволяет повысить пригодность конструкций к нормальной эксплуатации и безопасность их при внешних воздействиях.

Применение в стропильных балках полого отогнутой предварительно напряженной арматуры, обеспечивающей обжатие бетона в соответствии с траекторией главных растягивающих напряжений, способствует повышению трещиностойкости наклонных сечений до 20 % и прочности наклонных сечений до 16 %, а следовательно приводит к снижению поперечного армирования и уменьшению геометрических размеров сечения. В свою очередь, благодаря отгибу рассредоточивается напрягаемая арматура по торцу балки, уменьшается вероятность образования горизонтальных трещин на ее концевых участках, улучшаются условия бетонирования опорных зон балок. Так в работах [1, 2, 3] предложено в балочных конструкциях с соотношением высоты сечения к длине элемента $1/8 \div 1/20$ и месторасположением перегиба арматуры от торца элемента $1/3 \div 1/4$ части пролета при обжатии бетона с торцов конструкций угол наклона предварительно напряженных отогнутых канатов к продольной оси элемента принимать $9^\circ \div 20^\circ$. Однако результатами экспериментальных исследований [1, 2, 3] процесс образования и развития наклонных трещин на участках действия изгибающих моментов и поперечных сил и характера разрушения балочных элементов установлено, что влияние отгибов на напряженно-деформированное состояние бетона при сопротивлении его срезу учитывается в недостаточной степени.

Следует отметить, что более широкое применение предварительно напряженных конструкций с прямолинейной напрягаемой арматурой по сравнению с криволинейным ее расположением, в настоящее время вызвано трудоемкостью работ по натяжению арматуры и необходимостью наличия приспособлений, обеспечивающих натяжение арматуры в отогнутом положении или оттяжку ее из первоначального горизонтального положения в проектное отогнутое [4,5].

В БрГТУ разработано конструктивное решение двухскатных балок [6, 7], в котором при сохранении основных конструктивных параметров балки, 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 полки 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 внешние грани балок были параллельны (рисунок 1). В средней части пролета конструкция сохраняет очертание двухскатной балки. Вследствие этого в опорной зоне прямолинейно направленная напрягаемая арматура располагается под пологим отгибом к продольной оси опорной части балки, а, следовательно, ее траектория соответствует переводу (отгибу) арматуры из нижней зоны сечения в пролете в верхнюю на опорах.



- а) стропильная железобетонная балка двугаврового сечения с ломанной нижней гранью
 б) решетчатая железобетонная балка прямоугольного сечения с ломанной нижней гранью

Рисунок 1 – Конструктивное решение стропильных балок ломаного очертания

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

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

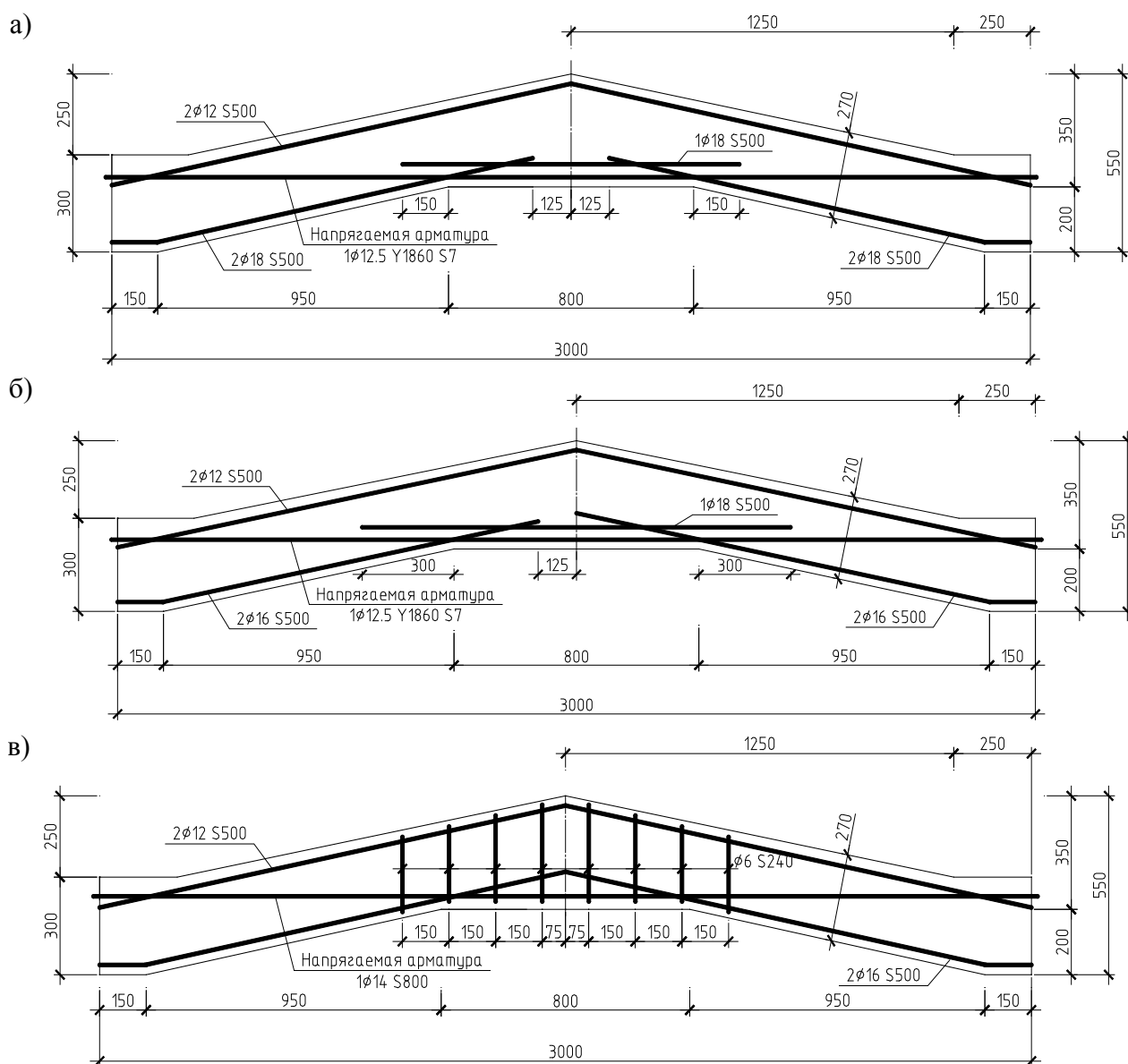
2. В пространстве, образованном изломом нижней грани балки, можно разместить подвесное подъёмно-транспортное оборудование, что может привести к уменьшению строительной высоты здания и тем самым снизить расход материалов на вертикальное ограждение объекта.

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 (рисунок 1, а) удастся достичь уменьшения расхода бетона на 10,6% и арматуры на 8,2%, а в решетчатых балках (рисунок 1, б) на 15% и 5% соответственно.

Несмотря на очевидные преимущества балок ломанного очертания процесс их внедрения в практику строительства сталкивается со значительными трудностями, которые связаны, главным образом, с недостатком информации о фактическом напряжённо-деформированном состоянии балок подобного типа, а также с отсутствием рекомендаций по их расчету и конструированию. В связи с этим в лаборатории кафедры строительных конструкций «ЛИПИСК» Брестского государственного технического университета были изготовлены предварительно напряженные железобетонные балки ломанного очертания и проведены экспериментальные исследования их напряжённо-деформированного состояния.

Всего было изготовлено и испытано 3 балки (таблица 1, рисунок 2). Длина опытных образцов составила 3 м, высота сечения переменная: минимальная 270 мм для наклонной части балки у опоры, максимальная 350 мм в коньке. Ширина сечения 120 мм по всей длине балки.



а) конструктивное решение балки Б-1; б) конструктивное решение балки Б-2;
в) конструктивное решение балки Б-3

Рисунок 2 – Конструктивное решение и армирование опытных образцов

Балки Б-1 и Б-2 изготовлены без поперечного армирования. Усилие предварительного обжатия создавалось при помощи напрягаемой арматуры – одного каната Y1860 S7 Ø12,5 мм. Для обеспечения прочности нормальных сечений в приопорной зоне была установлена ненапрягаемая арматура 2Ø18 мм класса S500 (балка Б-1) или 2Ø16 мм класса S500 (балка Б-2), в средней части – один стержень Ø18 мм S500.

В балке Б-3 в середине пролета было предусмотрено поперечное армирование в виде хомутов Ø6 мм класса S240, установленных с шагом 150 мм. В качестве напрягаемой арматуры в балке Б-3 был использован арматурный стержень Ø14 мм S800, а ненапрягаемая продольная арматура представлена двумя стержнями Ø16 мм класса S500.

Таблица 1 – Основные конструктивные характеристики опытных балок

Марка балок	Размеры, см				$\mu_{sp}, \%$	$\mu_s, \%$	Поперечная арматура	$f_{cm}, \text{МПа}$	Класс напрягаемой арматуры	Величина предварительного напряжения, МПа
	b	h_k	h_n	l_0						
Б-1	12	35	27	280	0,32	1,73	-	37,50	Y1860	1 226,60
Б-2	12	35	27	280	0,32	1,37	-	36,71	Y1860	1 214,15
Б-3	12	35	27	280	0,52	1,37	Ø6 S240 в середине пролета	57,46	S800	502,57

Загружение балок производилось двумя (балка Б-1) или четырьмя (балки Б-2 и Б-3) силами в пролете. Прогибы балок в плоскости действия сил определялись с помощью прогибомеров, установленных на опорах и в местах излома нижней грани балки, втягивание напрягаемых канатов в бетон на торце балки на стадиях отпуска и при нагружении внешней нагрузкой замеряли с помощью индикаторов часового типа.

В процессе испытаний образование первых нормальных трещин в месте излома нижней грани в балке Б-1 происходило при нагрузке $2F_{\text{exp}} = 40 \div 45$ кН. Шаг трещин составлял $7 \div 10$ см, ширина раскрытия – $W_k = 0,05 \div 0,10$ мм. При последующем возрастании нагрузки ($2F_{\text{exp}} = 55 \div 60$ кН) нормальные трещины в приопорной зоне при достижении ширины раскрытия $W_k = 0,15$ мм плавно переходили в слабонаклонные к вертикальной оси. При нагрузке $2F_{\text{exp}} = 65$ кН происходило образование явно выраженных наклонных трещин в приопорной зоне балки.

При испытании балки Б-2 нормальные трещины в зоне чистого изгиба возникли при нагрузке $4F_{\text{exp}} = 30 \div 40$ кН (изгибающий момент $M_{\text{exp}} = 11,25 \div 15$ кН·м). Одновременно происходило образование нормальных трещин в балке между первым и вторым пролетными грузами. Ширина раскрытия трещин составляла $W_k = 0,05$ мм, шаг трещин – $7 \div 8$ см. При нагрузке $4F_{\text{exp}} = 60$ кН (изгибающий момент $M_{\text{exp}} = 45$ кН·м) происходило отклонение нормальных трещин опорной зоны пролета от вертикали по направлению к пролетному грузу. Ширина раскрытия трещин составляла $W_k = 0,25$ мм. Образование наклонных трещин в приопорной зоне происходило при нагрузке $4F_{\text{exp}} = 80$ кН, ширина раскрытия $W_k = 0,10$ мм.

В балке Б-3 образование нормальных трещин отмечено при нагрузке $4F = 40$ кН в месте излома нижней грани и в зоне чистого изгиба. При увеличении нагрузки до $4F = 60$ кН нормальные трещины формировались ближе к опоре от места излома. Ширина раскрытия отмеченных трещин составляла $W_k = 0,10$ мм, шаг трещин – $7 \div 8$ см. При нагрузке $4F = 100$ кН начался процесс отклонения нормальных трещин по направлению к пролетному грузу у опоры. Одновременно формировались наклонные трещины в нижней трети сечения с ориентацией «опора-груз» в опорной зоне балки. Основная информация по результатам испытаний представлена в таблице 2.

Отличительной особенностью напряженно-деформированного состояния балок ломанного очертания является то, что образование нормальных трещин в зоне чистого изгиба (в зоне действия максимальных изгибающих моментов) и в приопорной зоне происходит одновременно, т.е. достигается равновеликая трещиностойкость по всей длине балки. Кроме этого следует отметить, что во всех трех опытных балках за несколько ступеней до разрушающей нагрузки происходил отрыв защитного слоя бетона в коньке балки в результате действия вертикальной составляющей усилия в сжатой зоне бетона. Очевидно, что образование наклонных трещин в середине пролета балки также связано с действием вертикальной составляющей, которая при данном конструктивном решении балки и предложенной схеме испытаний выступает в качестве фиктивной опоры.

Таблица 2 – Основные результаты экспериментальных исследований

Марка балок	Поперечная сила у опоры при разрушении балок V_{sd} , кН	Изгибающий момент при разрушении балок M_{sd} , кН·м	Характер разрушения
Б-1	52,5	52,5	По наклонной трещине в середине пролета с раздроблением бетона над вершиной трещиной
Б-2	60	45	По наклонной трещине у опоры в результате продергивания арматуры
Б-3	95	71,25	По нормальной трещине в середине пролета с раздроблением бетона в сжатой зоне

Изменение жесткости и увеличение деформаций опытных образцов после образования первых нормальных трещин характеризуется уменьшением угла наклона кривых к оси абсцисс графиков

относительных прогибов (рисунок 3). Данное обстоятельство свойственно изгибаемым предварительно напряженным железобетонным элементам с прямолинейным армированием, хотя существует мнение [1], что после образования нормальных трещин в зоне максимальных изгибающих моментов и первой наклонной трещины, зарождающейся с растянутой грани в приопорной зоне, работа балки приближается к работе шпренгельной системы.

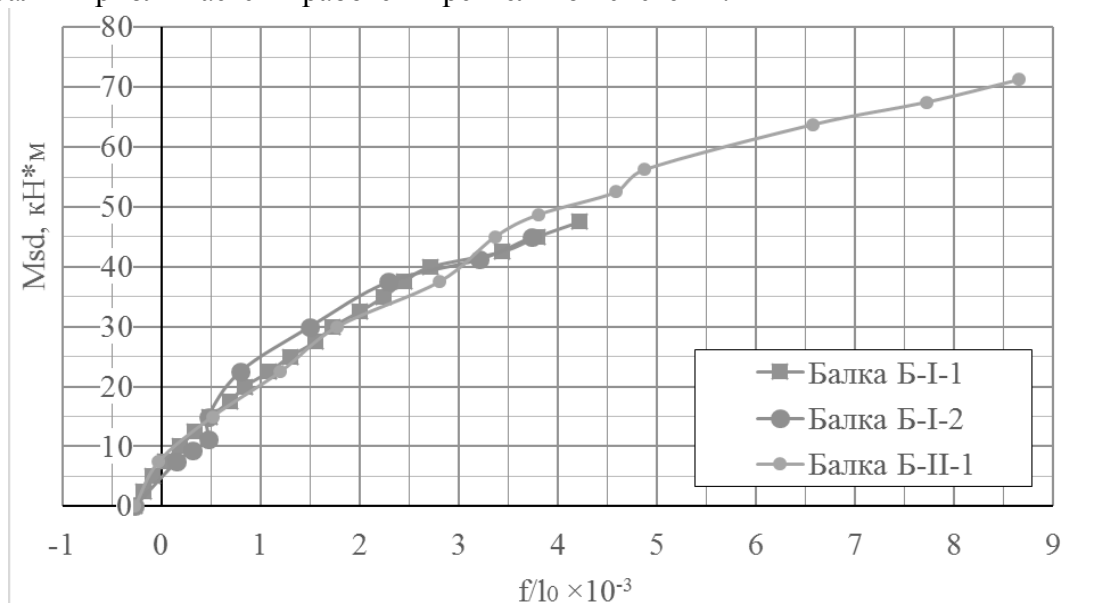


Рисунок 3 – Графики относительных прогибов опытных балок

Выводы

1. Отгиб части продольной напрягаемой арматуры из нижней зоны сечения в пролете в верхнюю на опорах повышает трещиностойкость и прочность наклонных сечений, а также способствует к снижению материалоемкости, повышению экономической эффективности и долговечности стропильных балок покрытия.

2. Конструктивное решение двускатной балки с ломаным очертанием нижней грани позволяет при прямолинейной напрягаемой арматуре сохранить положительные качества балок с отогнутой арматурой. При этом также улучшаются объемно-планировочные параметры здания и эксплуатационные условия кровли.

3. Значительный уклон верхней грани балки приводит к формированию в коньке вертикальной составляющей результирующего усилия в сжатом бетоне. Данное обстоятельство приводит к отрыву сжатой зоны бетона в верхней трети сечения и формированию наклонных трещин в средней части пролета. Постановка поперечного армирования в середине пролета балки позволяет увеличить несущую способность на 35% по сравнению с балками без поперечного армирования средней зоны.

4. Образование нормальных трещин происходит одновременно как в зоне действия максимальных изгибающих моментов, так и в приопорной зоне. Таким образом, балка ломаного очертания отличается от балок с отогнутой арматурой равновеликой трещиностойкостью по всей длине, что свидетельствует о более эффективном использовании высокопрочной арматуры в подобного рода конструкциях.

5. По результатам сравнения опытно запроектированных вариантов балок установлено, что усовершенствованный вариант стропильной балки ломаного очертания со сплошной стенкой в сравнении с типовыми балками имеет лучшие экономические показатели по расходу стали на 8,2%, расходу бетона – на 10,6%, решетчатой балки на 5% и 15% соответственно.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Малиновский, В.Н. Сопротивление предварительно напряженных балок из высокопрочного бетона с отогнутой стержневой арматурой при изгибе с поперечной силой : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В. Н. Малиновский. – Ленинград, 1988 – 153 с.
2. Кривицкий, П.В. Сопротивление срезу предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутыми канатами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / П. В. Кривицкий. – Брест, 2016 – 167 с.
3. Сасонко, Л. В. Исследование изгибаемых предварительно напряженных железобетонных конструкций с отогнутой арматурой : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Л. В.Сасонко. – М., 1974 – 146 с.
4. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с пологим отгибом части продольной предварительно напряженной арматуры/ Н.Н. Шалобыта, В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий // Вестник БрГТУ. – 2010. – № 1(61): Строительство и архитектура. – С. 78–81.
5. Совершенствование конструкций плит покрытий промышленных зданий / Бердичевский Г.И., Дмитриев Ю.В., Сасонко Л.В. и др.// Бетон и железобетон/. – 1970.–№8 – с. 20-22.
6. Двускатная стропильная балка : пат. 9507 Респ. Беларусь, МПК Е 04В 1/06 / В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий, Н.Н. Шалобыта ; 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.
7. Решетчатая стропильная балка: пат. 10178 Респ. Беларусь, / В.Н. Малиновский, Н.В. Матвеев, 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).