



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2011, ТОМ 17, НОМЕР 4, 261–269

УДК 624.04:624.14:624.072.22

(11)-0252-1

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛКИ З ГНУЧКОЮ СТІНКОЮ

В. Є. Волкова, А. А. Макарова

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна,
вул. ак. В. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010.*

E-mail: dr@ev@mail.ru

Отримана 8 липня 2011; прийнята 25 листопада 2011.

Анотація. У роботі виконано дослідження напружено-деформованого стану балок конвеєрної галереї. Запропоновано три варіанти конструктивного рішення головних балок конвеєрної галереї: широкополичний двотавр, балки з гнучкою і жорсткою стінками. На основі методу кінцевих елементів отримано поля напружень і деформацій, виявлено зони локальних напружень. З метою зниження локальних напружень і забезпечення місцевої стійкості стінки балки показано необхідність встановлення додаткових поперечних ребер у приопорній зоні. Моделювання балок із гнучкою стінкою виконувалося з урахуванням геометричної нелінійності. Також було виконано аналітичне дослідження напружено-деформованого стану балки з гнучкою стінкою, згідно з «Керівництвом з проектування сталевих тонкостінних балок» ЦНДІПроектстальконструкція. Співставлення отриманих результатів з даними чисельного моделювання показали задовільний збіг. Аналіз моделі тонкостінної балки виявив значний запас несучої здатності близько 20 %.

Ключові слова: балка з гнучкою стінкою, напружено-деформований стан, метод кінцевих елементів, чисельне моделювання, поля напружень і деформацій.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛКИ С ГИБКОЙ СТЕНКОЙ

В. Е. Волкова, А. А. Макарова

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна,
ул. ак. В. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010.*

E-mail: dr@ev@mail.ru

Получена 8 июля 2011; принята 25 ноября 2011.

Аннотация. В работе выполнено исследование напряженно-деформированного состояния балок конвейерной галереи. Предложено три варианта конструктивного решения главных балок конвейерной галереи: широкополочный двутавр, балки с гибкой и жесткой стенками. На основе метода конечных элементов получены поля напряжений и деформаций, выявлены зоны локальных напряжений. С целью снижения локальных напряжений и обеспечения местной устойчивости стенки балки показано необходимость установки дополнительных поперечных ребер в приопорной зоне. Моделирование балок с гибкой стенкой выполнялось с учетом геометрической нелинейности. Также было выполнено аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния балки с гибкой стенкой, согласно «Руководства по проектированию стальных тонкостенных балок» ЦНИИПроектстальконструкция. Сопоставление полученных результатов с данными численного моделирования показали удовлетворительное совпадение. Анализ модели тонкостенной балки выявил значительный запас несущей способности порядка 20 %.

Ключевые слова: балка с гибкой стенкой, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, численное моделирование, поля напряжений и деформаций.

THE NUMERICAL SIMULATION OF THIN-WALLED GIRDER DEFLECTED MODE

Victoria Volkova, Ganna Makarova

*Dnepropetrovsk National University of the Railway Transport named after acad. V. Lazaryan,
2, acad. V. Lazaryan Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010.*

E-mail: drvev@mail.ru

Received 8 July 2011; accepted 25 November 2011.

Abstract. In this paper we have investigated the deflected mode of conveyor gallery girders. Three variants of the constructive concept of main conveyor gallery girder were proposed: H-girder, girders with flexible and hard wall. Based on the finite element method, stress and strain fields were derived. Areas of local stresses were identified. In order to reduce local stresses and to ensure local stability of the girder wall, the need to install additional two-side stiffener in zone near the support was shown. The modeling of thin-walled girders was made according to the geometric nonlinearity. The analytical study of thin-walled girder deflected mode was performed according to the «Guidelines for the design of steel thin-walled girders» CSIIProjectsteelconstruction. Comparison of the results with numerical simulations showed a satisfactory agreement. Analysis of thin-walled girder model revealed a significant stock carrying capacity of approximately 20 %.

Keywords: thin-walled girder, deflected mode, finite element method, numerical simulation, stress and strain fields.

Формулировка проблемы

В качестве несущих конструкций пролетных строений конвейерных галерей широко используются как балочные конструкции, так и оболочечки. Наибольшее распространение получили балочные конструкции, которые характеризуются высоким уровнем технологичности, ремонтпригодности и легкостью монтажа, что позволяет снизить капитальные и эксплуатационные расходы. Наиболее эффективным путем снижения металлоемкости является использование балок с гибкой стенкой, работающей в закритической стадии. При этом повышается расчетная несущая способность балок и снижается вес всей конструкции.

В статье приведены результаты анализа напряженно-деформированного состояния главной балки пролетного строения конвейерной галереи. Уменьшение толщины стенки балки позволяет снизить затраты металла на всю конструкцию до 25 %.

Особенность напряженно-деформированного состояния балок с гибкими стенками в том, что пояса работают не только на сжатие, но и на изгиб от натяжения стенки. Вследствие этого необходимо применять сечения поясов с повышенной жесткостью на изгиб и кручение. Однако недостатком такого конструктивного

решения является повышение трудоемкости изготовления конструкции ввиду увеличения объема сварочных работ.

Анализ существующих исследований

Впервые тонкостенные балки стали применяться для авиационных конструкций и в корабельном строительстве. Основы расчета тонкостенных конструкций были заложены в работах Г. Вагнера [3], В. И. Стригунова, П. Куна. И нашли дальнейшее развитие в работах Б. М. Броду [2], И. И. Ааре [1], посвященных исследованию гибких стенок в строительстве. Интенсивные систематические исследования балок с тонкими стенками как несущих строительных элементов началось в середине XX ст.

Однако особенности данного класса строительных конструкций, а также нагрузок, применяемых материалов и условий эксплуатации требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, что можно увидеть из зарубежных публикаций [12].

Стенка балки представляет собой пластину, испытывающую действие нормальных и касательных напряжений, которые могут вызывать потерю ее устойчивости. После потери устойчивости стенка таких балок способна воспри-

нимать значительные нагрузки в закритической стадии работы. Использование данного резерва несущей способности представляет интерес ввиду возможности существенно снизить вес и стоимость конструкции в целом. Величина данного резерва значительно увеличивается при наличии ребер жесткости.

Можно выделить два основных подхода к теоретическим исследованиям балок с гибкими стенками. Первый подход основан на построении условной статически допустимой модели предельного состояния. Был создан метод К. Баслера и Т. Тюрлимана [10], этот подход получил наибольшую известность и был положен в основу американских норм проектирования тонкостенных балок. В отсеке чистого сдвига, после потери стенкой устойчивости, возникает диагональная растянутая полоса. Дополнительные усилия воспринимаются поперечными ребрами и поясами балки (рис. 1). Расчетная схема представляет собой пластину шарнирно опертую по кромкам. Значение критической нагрузки определялись методами линейной теории устойчивости.

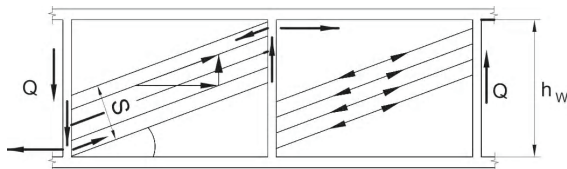


Рисунок 1. Расчетная модель отсека балки Баслера и Тюрлимана при сдвиге.

Недостатком данного метода является то, что он не учитывал влияние жесткости поясов на закритическую стадию работы отсеков балки. Позднее метод Баслера-Тюрлимана совершенствовался и уточнялся. Так, расчетная модель отсека при чистом сдвиге была дополнена пластическими шарнирами в верхнем поясе, которые образуются в предельном состоянии. Исследования Баслера стали основой Еврокода EN1993-1-5 [11].

К. Рокки и М. Шкалоуд уточнили угол наклона диагональной складки, который равен геометрической диагонали отсека. В зависимости от жесткости пояса происходит смещение шарнира пластичности. При повышении жесткости пояса шарнир сдвигается к центру отсека. Предельное состояние отсека наступает либо при достижении предела текучести напря-

жений в стенке, либо образованием пластических шарниров в сжатом поясе.

Расчетная модель Баслера и Тюрлимана при чистом изгибе (рис. 2) в дальнейшем совершенствовалась подбором более оптимального значения рабочей полосы сжатой части стенки.

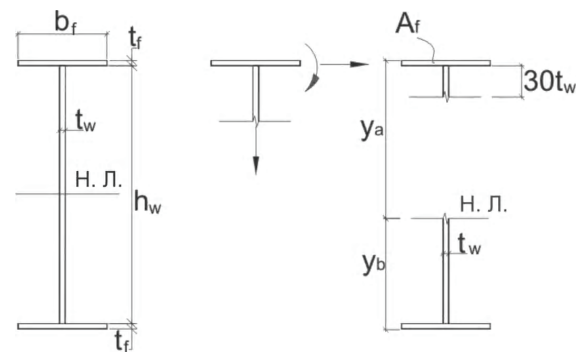


Рисунок 2. Расчетная модель балки с гибкой стенкой Баслера и Тюрлимана при изгибе.

На основе проведенных исследований было разработано «Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок» [8].

Представители второго подхода использовали метод, который сводится к решению уравнения равновесия и совместности деформаций Кармана-Маргерра для гибкой упругой пластинки. Поиск решений уравнений производится различными методами – конечных разностей и конечных элементов. Известными работами в этом направлении являются исследования И. Дюбека, И. И. Ааре. Предложенные ими методы недооценивали несущую способность тонкостенных балок. Причина этому в том, что используется уравнения Кармана-Маргерра, в основе которого лежит работа идеально упругой пластины. Результаты натурных испытаний И. Дюбека, И. И. Ааре [1] показывают, что работа пластины в закритической стадии характеризуется пластическими деформациями и прогибами из плоскости стенки, которые намного превышают толщину стенки. Становится очевидным необходимость учета геометрической и физической нелинейности [9].

Другое направление в исследовании балок с гибкими стенками учитывает в своих методах расчета и геометрическую, и физическую нелинейности [9]. Реализация данной задачи требует использования специальных программных комплексов, позволяющих учитывать нелинейные эффекты.

Предмет и методы исследования

Предметом исследования является двутавровая балка составного сечения с гибкой стенкой. Областью применения является главная балка пролетного строения конвейерной галереи. Пролетное строение (рис. 3) представлено в виде усложненной балочной клетки. С целью снижения трудоемкости изготовления балки настила и второстепенные балки принимаются из прокатных двутавров балочного типа. Сопряжение второстепенных и главных балок выполняется в одном уровне с верхним поясом на болтах нормальной точности. Применение болтовых соединений ускоряет процесс монтажа и повышает надежность всей конструкции. Таким образом, соединения балок работают как шарнирные.

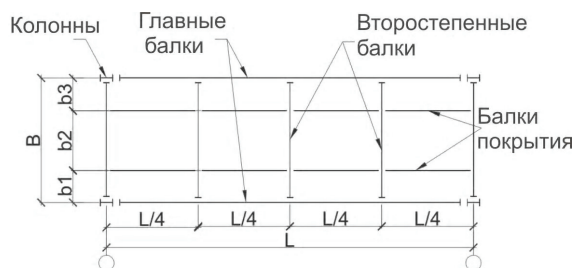


Рисунок 3. Схема балочной клетки усложненного типа.

В качестве вариантов конструктивного решения главной балки рассматривается широкополочный двутавр, сварные балки с гибкой и жесткой стенками. Гибкости стенок сварных балок с жесткой и гибкой стенками равны $\lambda_w = 125$ и $\lambda_w = 300$ соответственно. Общая устойчивость главных балок обеспечивается жесткостью сжатого пояса и второстепенными балками. Для обеспечения местной устойчивости стенок балок устанавливаются ребра жесткости.

Расчет производился с помощью проектно-вычислительного комплекса SCAD и математической системы Mathcad.

Численное исследование пролетного строения

Сбор нагрузок выполнен согласно ДБН В.1.2-2-2006 [5] с учетом всех возможных нагрузок и воздействий, которые могут возникать в процессе возведения, эксплуатации, транспортировки и хранения конструкций. Все на-

грузки, действующие на элементы конвейерной галереи, можно подразделить на три группы: технологические, строительные, от атмосферных воздействий. К строительным нагрузкам относятся – вес несущих стальных конструкций, ограждения, вес груза на ленте, вес промпроводок. К технологическим – вес конструкций конвейера, сопротивление движению ленты, ремонтная, нагрузка от пуска конвейера, вес просыпи, от обрыва или заклинивания ленты, вес пыли на покрытии. К атмосферным – вес снега, давление ветра. Основные нагрузки, действующие на главную балку рассматриваемого пролетного строения, приведены на рис. 4.

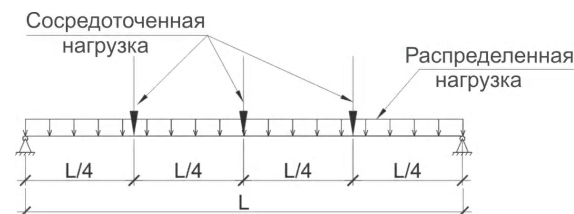


Рисунок 4. Нагрузки, действующие на главную балку.

Численное исследование напряженно-деформированного состояния пролетного строения производилось методом предельных состояний. Сопоставление напряженно-деформированного состояния выполнялось для трех вариантов.

Вариант 1. Главная балка в виде широкополочного двутавра рассматривается как изгибаемый элемент, и расчет производится по первой и второй группам предельных состояний. Расчетная нагрузка на главную балку от второстепенной балки увеличивается на 20 % вследствие внецентренной передачи нагрузки [6].

Вариант 2. При расчете балки составного сечения с жесткой стенкой подбираются сечения элементов балки. В целом балка проверяется на жесткость и общую устойчивость, характерные сечения балки – на прочность, а отдельные элементы – на местную устойчивость. Установленные поперечные ребра жесткости подлежат дополнительному расчету. Парные ребра рассчитываются как центрально сжатые стойки. Аналогично рассчитывается участок стенки балки над опорой. Опорные ребра проверяются на смятие.

Вариант 3. Особенности работы балки с гибкой стенкой отражаются и в расчете таких балок. Так, для аналитического расчета такой балки используются относительно простые модели предельных состояний отсеков балки в различных условиях работы. Рассматриваются отсеки, работающие на чистый изгиб, сдвиг и совместную работу изгиба и сдвига (рис. 5).

Условия работы средних отсеков балки приближаются к условиям чистого изгиба. При этом выпученная часть стенки выключается из работы в упругой стадии деформирования. В предельном состоянии напряжения в поясах достигают предела текучести, часть стенки включается в работу со сжатым поясом.

Предельная несущая способность балки при изгибе (1):

$$M_{пред} = k W R \geq M_p, \quad (1)$$

где R – расчетное сопротивление стали изгиба, k – редуцированный коэффициент, учитывающий выключение сжатой части стенки при ее работе на изгиб в закритической стадии.

Несущая способность отсека, работающего при сдвиге, проверяется на прочность (2).

$$Q_{пред} = \tau_{кр} h_{cm} t_{cm} + 2 C t_{cm} \sigma_t \frac{1}{1 + \alpha^2} \geq Q_p, \quad (2)$$

где $\tau_{кр}$ – критическое напряжение сдвига, C – ширина диагонального поля растягивающих напряжений стенки при ее работе в закритической стадии, σ_t – предельные растягивающие напряжения диагонального поля.

При чистом сдвиге предельное состояние наступает после образования пластического механизма в отсеке с появлением шарниров пластичности в поясах и диагональной пластической полосы в стенке.

При действии и сдвига, и изгиба на отсек внешний изгибающий момент воспринимается поясами, вызывая в стенке растяжение,

а в поясах местный изгиб. Пояса работают и на сжатие, и на изгиб от натяжения стенки, поэтому применяются сечения поясов с повышенной жесткостью на изгиб и кручение. Проверка несущей способности стенки – по приведенным напряжениям от растягивающих, сжимающих и касательных напряжений. Полное исчерпание несущей способности отсека возможно в результате развития пластических деформаций в диагональной полосе стенки с образованием пластических шарниров в сечениях пояса, потери устойчивости сжато-изогнутым поясом в плоскости или перпендикулярно плоскости стенки балки, местной устойчивости сжато-изогнутого пояса.

Необходимо проверять пояса на прочность в зависимости от величины изгибающего момента. При этом прочность пояса считается достаточной, если выполняются условия (3), (4), (5):

$$0 < M_p \leq 0.6 M_{пред}, Q_p \leq Q_{пред} \quad (3)$$

$$0.6 M_{пред} \leq M_p \leq M_n,$$

$$Q_p \leq Q_{пред}^o + (Q_{пред} - Q_{пред}^o) \frac{M_n - M_p}{M_n - 0.6 M_{пред}}; \quad (4)$$

$$M_n \leq M_p \leq M_{пред},$$

$$Q_p \leq Q_{пред}^o \left(\frac{M_{пред} - M_p}{M_{пред} - M_n} \right), \quad (5)$$

где M_n – изгибающий момент, воспринимаемый только поясами балки, $Q_{пред}^o$ – усилие сдвига, воспринимаемое стенкой отсека, при развитии в сжатом поясе отсека напряжений, равных расчетному сопротивлению стали изгиба.

В данной работе и при заданной нагрузке выполняется условие (3). Балка с гибкой стенкой работает в упругой стадии. Таким образом, балка с гибкой стенкой имеет большой запас прочности.

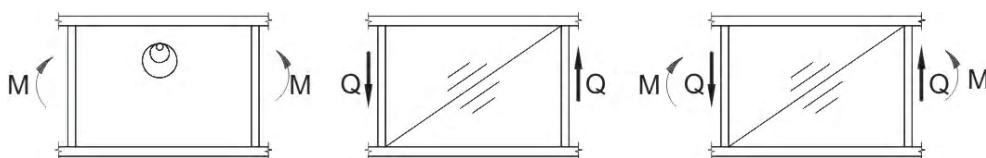


Рисунок 5. Расчетные модели отсеков: чистый изгиб, чистый сдвиг, совместное действие изгиба и сдвига.

Особое внимание уделено расчету опорного узла балки с тонкой стенкой. Опорные ребра подвержены влиянию изгиба от натяжения пластической полосы стенки, вызывающего опасность потери устойчивости ребра в плоскости стенки. Конструктивная мера – установка дополнительного двухстороннего ребра жесткости на расстоянии не менее ширины ребра.

Расчет по второй группе предельных состояний – учитывается повышенная деформативность балок. Момент инерции поперечного сечения балки уменьшается введением понижающего коэффициента.

Моделирование методом конечных элементов

Для моделирования методом конечных элементов [4], [7] использовался программный комплекс SCAD Office.

Расчетная система пролетного строения с главной балкой в виде широкополочного двутавра представлена в виде стержневой системы (рис. 6). Равномерно распределенная нагрузка действует по всем несущим элементам пролетного строения. Стержневая система (рис. 6) состоит из отдельных стержней с различными условиями закрепления в узлах.



Рисунок 6. Нагрузки, действующие на пролетное строение.

В опорных узлах перемещения в направлениях X , Y , Z запрещены. В узлах соединения главных и второстепенных балок установлены шарниры.

При анализе напряженно-деформированного состояния балок с гибкой и жесткой стенками используются конечные элементы (КЭ) типа пластины. Равномерно распределенная нагрузка действует на половину верхнего пояса в соответствии со способом опирания настила. В узле сопряжения главной и второстепенной балок действует сосредото-

ченная нагрузка, равная опорной реакции второстепенной балки. В узле крепления опорного ребра к колонне на болтах линейные перемещения по всем направлениям запрещены, а угловые – разрешены.

Для стержневой системы используются универсальные конечные элементы КЭ5 – пространственный стержень (рис. 7), состоящий из 2 узлов. КЭ5 используется для моделирование главных, второстепенных балок и балок настила. В узлах сопряжения балок их соединение шарнирное.

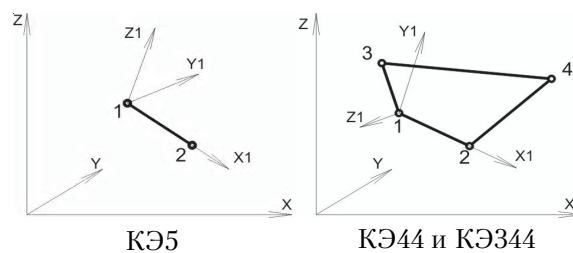


Рисунок 7. Конечные элементы.

Моделирование по вариантам 2 и 3 представлены в виде пластинчатых систем. В процессе исследования было рассмотрено большое количество пробных моделей. Модели с различным количеством и типами конечных элементов. Выполнялся подбор оптимальной сетки конечных элементов. Окончательная модель использует конечные элементы оболочки (рис. 7), а сетка позволяет наиболее полно описать работу балки. КЭ44 является универсальный четырехугольный конечный элемент оболочки, состоящий из 4 узлов каждый с 6 степенями свободы. Эти элементы использовались для моделирование поясов, опорных и поперечных ребер и жесткой стенки.

При моделирование варианта 3 было необходимо учитывать геометрическую нелинейность. Ввиду этого при моделировании стенки балки применялись трехмерные конечные элементы оболочки – КЭ344, позволяющие задавать геометрическую нелинейность. КЭ344 используются для моделирования гибкой стенки. При введении в счет формул 3, 4, 5, в предположении упругой стадии работы стенки, сопоставление результатов численного моделирования и аналитического расчета показало их расхождение на 3 %.

Графические результаты моделирования балки демонстрируют распределение усилий, которые возникают в балке. Значения напряжений и деформаций в балке с гибкой стенкой представлены на рисунках 8, 9.

В опорном узле стенки балки зафиксированы значительные напряжения. Размеры

этой зоны стенки балки составляют приблизительно четверть высоты стенки. Для уменьшения влияния локальных напряжений и обеспечения местной устойчивости целесообразна установка дополнительных двухсторонних ребер жесткости на расстоянии ширины ребра (рис. 10).

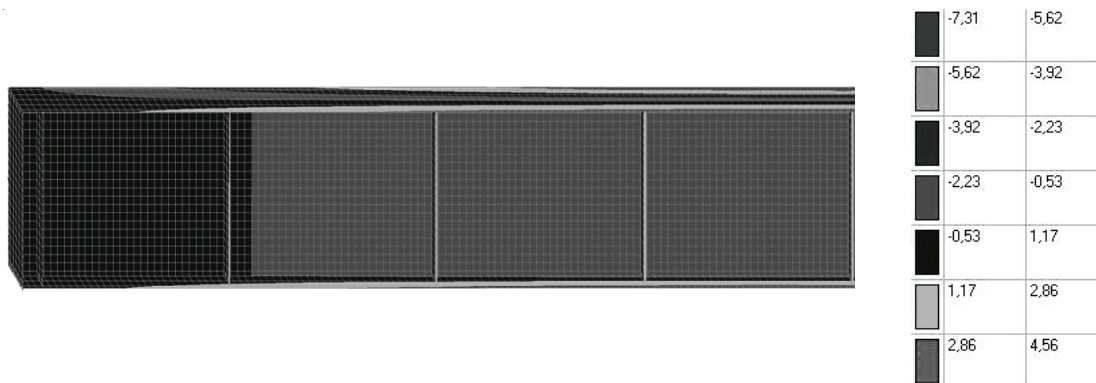


Рисунок 8. Поля деформаций для балки с гибкой стенкой.

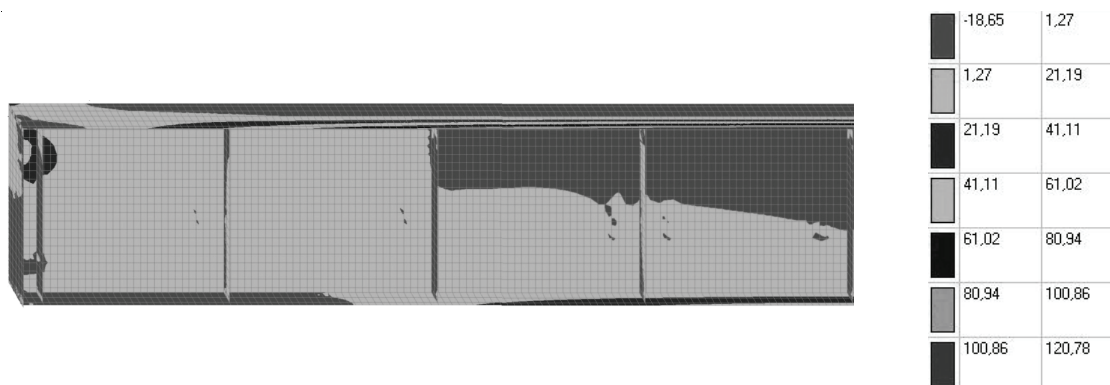


Рисунок 9. Поля напряжений для балки с гибкой стенкой.

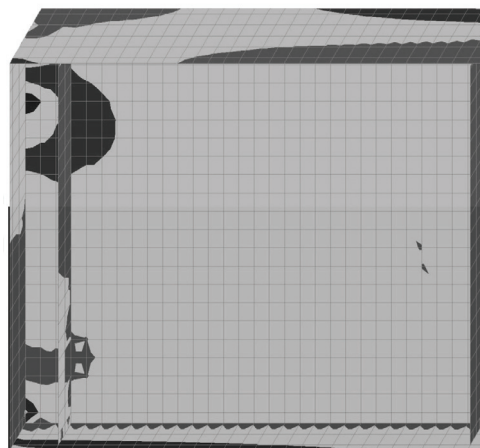


Рисунок 10. Опорный узел балки с гибкой стенкой.

Выводы

Пролетное строение конвейерной галереи характеризуется сложным напряженно-деформированным состоянием. Были рассмотрены три варианта конструктивных решений главной балки. Тонкостенная балка в сравнении с широкополочным двутавром и балкой с жесткой стенкой является более эффективным решением. Техничко-экономический анализ и обработ-

ка данных показали, что вариант использования балки с гибкой стенкой является наиболее экономичным по затратам материала.

И анализ методом конечных элементов, и численный анализ показали, что тонкостенная балка имеет значительный запас несущей способности. При условии заданной расчетной схемы и действующих нагрузок, запас несущей способности тонкостенной балки приблизительно равен 20 %.

Литература

1. Ааре, И. И. Исследование работы опорной панели сплошной стальной балки в послекритической стадии [Текст] : автореф. дис. ... науч. степени канд. техн. наук : 05.23.01 / И. И. Ааре. – Таллин, 1958. – 33 с.
2. Броуде, Б. М. О закритическом поведении гибких стенок стальных стержней [Текст] / Б. М. Броуде // Строительная механика и расчет сооружений. – 1976. – № 1. – С. 7–12.
3. Вагнер, Г. В. Балки с весьма тонкой стенкой [Текст] / Г. В. Вагнер // Прочность и устойчивость тонкостенных конструкций в самолетостроении : Сборник рефератов и переводов / под редакцией А. А. Уманского и П. М. Знаменского. – М. : ЦАГИ, 1937. – С. 58–117.
4. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Мalyarenko [и др.]. – М. : СКАД СОФТ, 2007. – 609 с.
5. Державні будівельні норми. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст] : ДБН В.1.2-2:2006. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007-01-01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 61 с.
6. Металлические конструкции. В 3 т. Т 1. Элементы конструкций [Текст] / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов [и др.] ; под ред. В. В. Горева. – М. : Высш. шк., 2004. – 551 с.
7. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К. : Сталь, 2002. – 600 с.
8. Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок [Текст] / Госстрой СССР, Главпромстройпроект, Союзметаллостройниипроект, ЦНИИПроектстальконструкция. – М. : [б. и.], 1977. – 28 с.
9. Abspoel, R. Optimizing plate girder design [Текст] / R. Abspoel // Nordic Steel Construction Conference. September 2–4, 2009. Malmö, Sweden / Lulea University of Technology, Swedish Institute of Steel Construction. – Malmö, 2009. – P. 524–531.

References

1. Aare, I. I. Research of support panel of plain steel girder in postcritical stage: autoabstract dissertation PhD (Eng.): 05.23.01. Tallin, 1958. 33 p. (in Russian)
2. Broude, B. M. Postbuckling behavior of surface of steel bars. In *Construction Mechanics and Building Design*, 1976, No. 1, p. 7–12. (in Russian)
3. Vagner, G. V. Beams with rather thin sides. In *Strength and stiffness of structures with thin sides in aircraft industry*. Moscow: TsAGI, 1937, p. 58–117. (in Russian)
4. Karpilovskiy, V. S.; Kriksunov, E. Z.; Malyarenko, A. A. et al. Computer complex SCAD. Moscow: SKAD SOFT, 2007. 609 p. (in Russian)
5. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects: DBN B.1.2-2:2006. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
6. Gorev, V. V. (ed.); Uvarov, B. Yu.; Filippov, V. V. et al. Metal Constructions. The third issue. Part 1. Constructional elements. Moscow: Vyssh. shk., 2004. 551 p. (in Russian)
7. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Design model of structures and ability of their analysis. Kyiv: Stal, 2002. 600 p. (in Russian)
8. Guidance for design of steel beams with thin sides. Moscow, 1977. 28 p. (in Russian)
9. Abspoel, R. Optimizing plate girder design. In *Nordic Steel Construction Conference*. Malmö, Sweden, 2009, p. 524–531.
10. Basler, K.; Yen, B.-T.; Mueller, J. A.; Thurlimann, B. Web buckling test on welded plate girders. In *Welding Research Council*, 1960, Bulletin 64.
11. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1.5 Plated structural elements: EN 1993-1-5. – 2006.
12. Lee, J.; Lee, S. Flexural-torsional behavior of thin-walled composite beams. In *Thin Walled Structures*, 2004, No. 42, p. 1293–1305.

10. Web buckling test on welded plate girders [Текст] / K. Basler, B.-T. Yen, J. A. Mueller and B. Thurlimann // Welding Research Council. – New York, 1960. – Bulletin 64.
11. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1.5 Plated structural elements [Текст] : EN 1993-1-5. – 2006.
12. Lee, J. Flexural-torsional behavior of thin-walled composite beams [Текст] / J. Lee, S. Lee // Thin Walled Structures. – 2004. – No. 42. – P. 1293–1305.

Волкова Вікторія Євгенівна – доктор технічних наук, професор кафедри будівельних конструкцій Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. Лауреат премії Президента України 2007 р. Наукові інтереси: зворотні задачі динаміки будівельних конструкцій, діагностика технічного стану будівельних конструкцій. Участь у розробці будівельних норм проектування.

Макарова Ганна Олексіївна – аспірант кафедри будівельних конструкцій Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану тонкостінних конструкцій, чисельне моделювання.

Волкова Виктория Евгеньевна – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Лауреат премии Президента Украины 2007 г. Научные интересы: обратные задачи динамики строительных конструкций, диагностика технического состояния строительных конструкций. Участие в разработке строительных норм проектирования.

Макарова Анна Алексеевна – аспирант кафедры строительных конструкций Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Научные интересы: исследование напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций, численное моделирование.

Victoria Volkova – DSc (Eng), Professor of the Building Constructions Department of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. Laureate of the President 2007. Scientific interests: inverse problems of dynamics of building structures, diagnostics of technical state of building constructions. Participation in development of building norms of planning.

Ganna Makarova – is postgraduate student of the Building Constructions Department of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. Scientific interests: thin-walled structure deflected mode investigation, numerical simulation.