

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-473-480>

УДК 62.419

Прочностной и деформационный анализ трехслойной ортотропной плиты с использованием программного комплекса ANSYS

Докт. техн. наук, доц. Е. А. Мойсейчик¹⁾, А. А. Яковлев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье проанализированы достоинства и недостатки трехслойных ортотропных плит. Показано, что при разработке конструкции таких плит необходимо прорабатывать технологию соединения элементов в составе конструкции. Использование лазерной сварки эффективно для соединения элементов небольших толщин. Такая сварка листовых элементов толщиной 12–50 мм имеет ряд ограничений, а прочностные характеристики соединений недостаточно исследованы. Поэтому при изготовлении конструкций большой грузоподъемности часто используются стальные трехслойные ортотропные плиты, соединение пластин между собой выполняется с применением электродуговой сварки. Имеющийся опыт показывает, что значительное количество пересечений сварных швов в местах соединений требует соблюдения определенной технологической последовательности выполнения работ для снижения деформаций, возникающих при сварке, и предотвращения возникновения трещин при эксплуатации в зонах с отрицательными температурами, а также квазистатических и переменных нагрузках. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния плиты с использованием многофункционального программного комплекса ANSYS. Проведено испытание модельной и натурной плит на действие поперечных нагрузок. Установлено, что вследствие сварочных напряжений возможно отклонение фактической геометрии плиты от проектной. Сопоставляя результаты вертикальных перемещений теоретических расчетов и натуральных испытаний, обосновываются результаты отклонений. После проведения экспериментов и осмотра испытываемых образцов в местах соединения элементов между собой разрушение прорезных швов не выявлено. При достижении предельной нагрузки, прикладываемой к модели плиты, выявлены трещины в сварных швах, расположенных по периметру покрывочной плиты. Установлено, что в конструкции сварных трехслойных плит в местах пересечения листов между собой сварной шов является концентратором дефектов. Применение ручной или полуавтоматической сварки способствует зарождению трещин при переменных нагрузках и эксплуатации при отрицательных температурах. Данная проблема требует выявления трещиноопасных зон в трехслойных плитах с использованием методов неразрушающего контроля и экспериментальных исследований прочности разных технических решений с применением конструктивных и сварочных концентраторов напряжений.

Ключевые слова: стальная трехслойная ортотропная плита, квазистатическое нагружение, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Мойсейчик, Е. А. Прочностной и деформационный анализ трехслойной ортотропной плиты с использованием программного комплекса ANSYS / Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 6. С. 473–480. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-473-480>

Strength and Deformation Analysis of Three-Layer Orthotropic Slab Using the ANSYS Software Package

Е. А. Moiseychik¹⁾, А. А. Yakovlev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper analyzes the advantages and disadvantages of three-layer orthotropic slabs. It is shown that when developing the design of such slabs, it is necessary to work out the technology for connecting elements within the structure.

Адрес для переписки

Мойсейчик Евгений Алексеевич
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 146а,
20114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 374-96-77
mit_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Moiseychik Evgeny Alekseevich
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: + 375 17 374-96-77
mit_ftk@bntu.by

The use of laser welding is effective for joining elements of small thicknesses. Such welding of sheet elements with a thickness of 12–50 mm has a number of limitations, and the strength characteristics of the joints have not been sufficiently studied. Therefore, in the manufacture of heavy-duty structures, three-layer orthotropic steel plates are often used; the plates are connected to each other using electric arc welding. Current experience shows that a significant number of weld intersections at joints requires compliance with a certain technological sequence of work to reduce deformations that occur during welding and prevent the occurrence of cracks during operation in areas with negative temperatures, as well as quasi-static and variable loads. An analysis of the stress-strain state of the slab was carried out using the ANSYS multifunctional software package. The model and full-scale slabs were tested for lateral loads. It has been established that due to welding stresses, it is possible that the actual geometry of the slab may deviate from the design one. By comparing the results of vertical movements of theoretical calculations and full-scale tests, the results of deviations are substantiated. After conducting experiments and inspecting the test samples at the points where the elements are connected to each other, the destruction of the slotted seams was not detected. When the maximum load applied to the slab model was reached, cracks were detected in the welds located along the perimeter of the cover slab. It has been revealed that in the design of welded three-layer plates, in the places where the sheets intersect, the weld is a concentrator of defects. The use of manual or semi-automatic welding contributes to the initiation of cracks under variable loads and operation at low temperatures. This problem requires the identification of crack-dangerous zones in three-layer slabs using non-destructive testing methods and experimental studies of the strength of various technical solutions using structural and welding stress concentrators.

Keywords: steel three-layer orthotropic plate, quasi-static loading, finite element model, stress-strain state

For citation: Moiseychik E. A., Yakovlev A. A. (2024) Strength and Deformation Analysis of Three-Layer Orthotropic Slab Using the ANSYS Software Package. *Science and Technique*. 23 (6), 473–480. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-473-480> (in Russian)

Введение

Трехслойная плита состоит из среднего слоя и двух внешних листов, расположенных сверху и снизу. Средний слой воспринимает возникающие поперечные усилия, внешние слои – изгибающие и работают как балка. Конструктивно средний слой изготавливается в виде периодически замкнутых ячеек прямоугольной или квадратной формы, что обеспечивает устойчивость внешних листов в зонах их сжатия, восприятие возникающих усилий, а при приложении сосредоточенных усилий – местную жесткость конструкции.

Опыт эксплуатации трехслойных плит проявил их высокую эффективность, достоинства и некоторые недостатки [1–9]. Такая трехслойная плита имеет повышенную изгибную жесткость, малый вес и восприятие сопротивлению кручения. Технически есть возможность внешние слои изготавливать из высокопрочных сталей, а средний слой из обычных. Способность среднего слоя воспринимать нагрузку зависит от его конструкции и жесткостных характеристик. Трехслойные плиты и оболочки нашли применение в области судостроения, в ходе эксплуатации подтвердили свою высокую эффективность [1].

Впервые в транспортных сооружениях такое конструктивное решение применил английский инженер Р. Стефенсон [1–3] при строительстве моста «Британия» (рис. 1а, б). Он выполнен в форме трубы прямоугольного

сечения с применением кованого листового железа толщиной 16 мм и заклепочных соединений. Были изготовлены балки шириной 4,5 м отдельными секциями (рис. 1с). Прямоугольное сечение и использование трехслойных плит для нижнего и верхнего поясов балки обеспечили высокую несущую способность и срок эксплуатации более 120 лет [3].

В работе [4] сравнили данные экспериментальных испытаний трехслойных металлических плит со средним слоем из гофр с результатами численных и аналитических расчетов напряженно-деформированного состояния. Оказалось, что конечно-элементные расчеты наилучшим образом согласуются с экспериментальными измерениями. Данные аналитических расчетов прочности превышали соответствующие экспериментальные величины. Технологически средний слой изготавливался с сочленением листовых элементов посредством прорезей, выполненных электроэрозивной резкой, и последующей пайкой в вакуумной печи в среде аргона. Опыт применения трехслойных облегченных конструкций используется в строительной, транспортной, авиационной, космической отраслях [5–23].

Конструкции в виде плит, опирающиеся на упругое основание и нагруженные большими сосредоточенными и распределенными силами, – это элементы рамы автомобилей большой грузоподъемности, ворота, воспринимающие взрывную волну и др. [6].

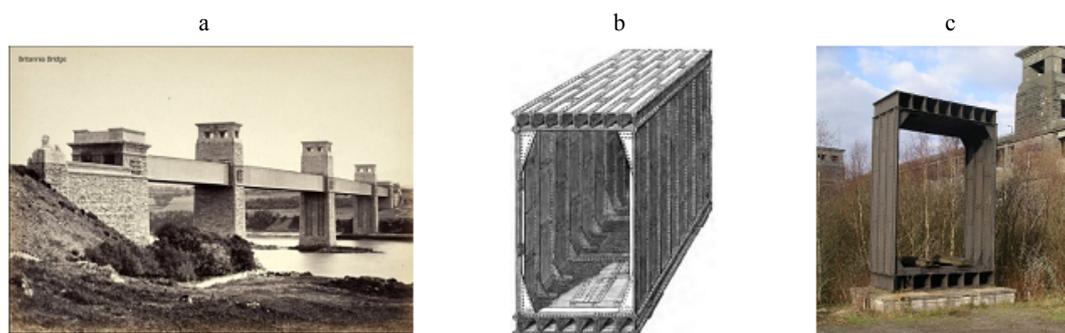


Рис. 1. Конструктивное решение трубчатого моста «Британия»: а – трубчатый мост «Британия» (1846–1970) [2]; б – вид пролетного строения моста [3]; с – монтажная секция моста [2]

Fig. 1. Structural solution of the tubular bridge “Britannia”: а – tubular bridge “Britannia” (1846–1970) [2]; б – view of the bridge span [3]; с – bridge assembly section [2]

Для решения таких сложных инженерных задач плиты должны иметь небольшую толщину для уменьшения собственного веса конструкции и восприятия больших нагрузок, а также возможность корректировки узлов при изменении расчетной схемы в местах опирания. При разработке конструктивного решения среднего слоя необходимо особое внимание уделять его технологичности [10]. Технология производства составляющих трехслойной ортотропной плиты может оказывать существенное влияние на выбор конструкции слоев и работоспособность плиты. Анализ современных способов получения трехслойных панелей из алюминиевых сплавов представлен в работе [11]. Наиболее часто соединение металлических элементов в составе конструкции выполняется лазерной сваркой [18–20]. Однако сварка листовых элементов толщиной 12–50 мм имеет ряд ограничений [24] и прочностные характеристики таких соединений недостаточно исследованы.

Целью настоящей статьи является расчетно-экспериментальное обоснование конструктивного решения стальной ортотропной плиты большой грузоподъемности при минимальной ее толщине с учетом фактических технологических ограничений.

Обоснование конструктивного решения

Конструктивное решение разрабатываем в два этапа: на первом этапе разрабатываем и исследуем модель плиты, на втором – натурную конструкцию с учетом результатов испытаний ее модели [10]. Предполагается, что натурная плита будет работать согласно расчетной схеме и воспринимать большие прикладываемые нагрузки (до 2000 кН/м^2) при небольшой отно-

сительной высоте ($h/L \approx 1/20-1/40$), соответственно возникающие в плите напряжения при таких нагрузках будут иметь значительные величины. Конструктивно предусмотрено, что слои плиты (внешние и средний) выполняются из достаточно прочных материалов (металлические листы и др.). Соединения пластин (слоев), воспринимающих сдвигающие усилия, должны обеспечивать требуемую прочность, а также быть технологичными при изготовлении (например, сварными). Заданным условиям может удовлетворять конструктивная схема ортотропной плиты, представленная на рис. 2.

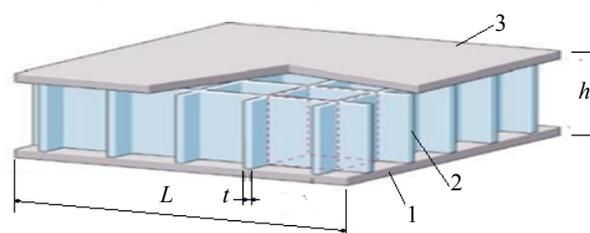


Рис. 2. Стальная трехслойная ортотропная плита с прямоугольными ячейками в среднем слое:

- 1 – нижний слой; 2 – средний слой;
3 – верхний слой (покрывочный)

Fig. 2. Steel three-layer orthotropic plate with rectangular cells in the middle layer: 1 – bottom layer; 2 – middle layer; 3 – top layer (covering)

Существующее решение активно применяется как корпус конструкции судов (двойное днище и др. [5]). Однако их высота h в судостроении не менее чем в 4–5 раз больше, чем высота рассматриваемой плиты. При изготовлении стальной ортотропной плиты все соединения элементов были выполнены сварными. Твердотельная цифровая модель такой плиты представлена на рис. 3, а конечно-элементная – на рис. 4. Равномерно распределенная внешняя

нагрузка прикладывается в средней части верхней плиты. Опирание плиты – шарнир (четыре точки) в специальном углублении внизу плиты.

На сегодняшний день в транспортных сооружениях применяют ортотропный стальной настил проезжей части. Рассматривается как

двухслойная ортотропная плита, состоящая из взаимно перпендикулярных пластинчатых ребер, объединенных плоским листом.

На рис. 5 изображена цифровая модель двухслойной ортотропной плиты с продольными и поперечными ребрами, аналогичными ребрам среднего слоя плиты, указанной на рис. 4.

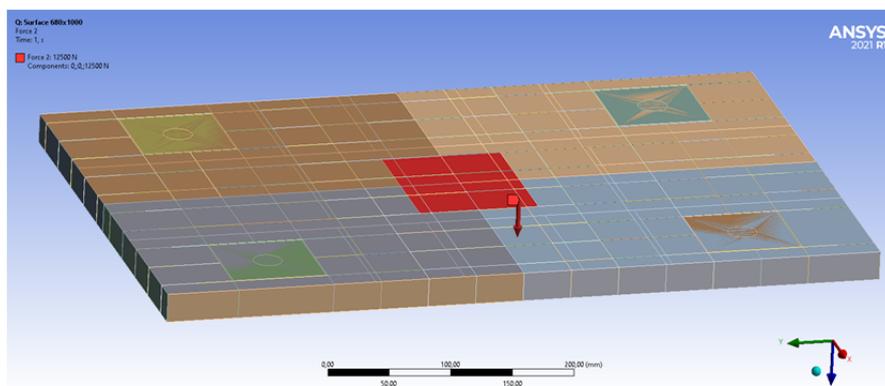


Рис. 3. Трехмерная твердотельная цифровая модель трехслойной ортотропной плиты (600×400×30 мм) со схемой приложения внешней равномерно распределенной нагрузки

Fig. 3. Three-dimensional solid-state digital model of a three-layer orthotropic slab (600×400×30 mm) with a scheme for applying an external uniformly distributed load

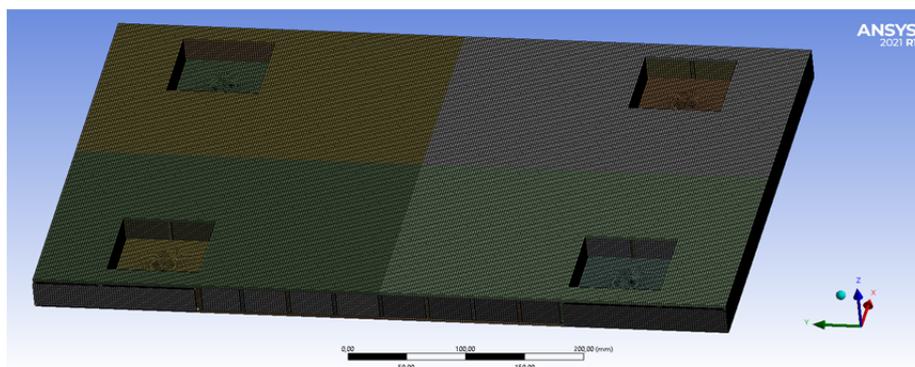


Рис. 4. Цифровая модель трехслойной ортотропной плиты (600×400×30 мм)

Fig. 4. Digital model of a three-layer orthotropic slab (600×400×30 mm)

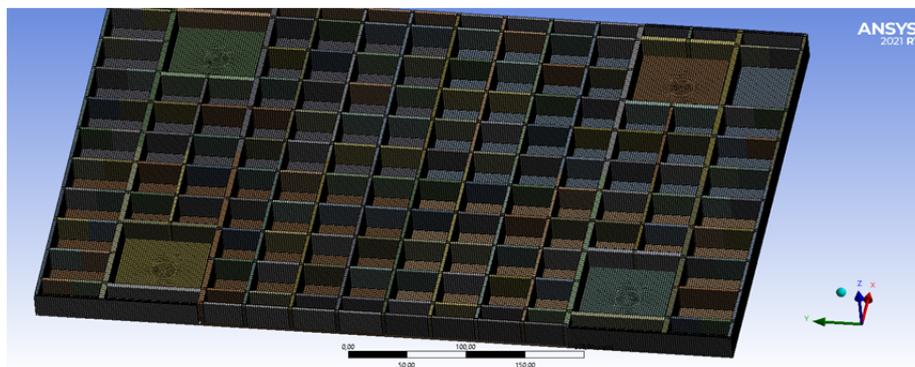


Рис. 5. Цифровая модель двухслойной ортотропной плиты (600×400×27 мм)

Fig. 5. Digital model of a two-layer orthotropic slab (600×400×27 mm)

Изготовление плиты, показанной на рис. 5, не вызывает технологических сложностей. Сборка трехслойной плиты (рис. 4) усложняется монтажом покрывочной плиты (рис. 2). В этом случае используются прорезные швы полного заполнения [12], по периметру покрывочного листа выполняется обварка угловыми швами.

Для соблюдения геометрических характеристик плиты оси прорезных швов должны совпадать с осями поперечных или продольных ребер среднего слоя, а прорезы под швы не должны превышать толщину ребер. Сложное монтажное решение трехслойной плиты имеет ряд конструктивных и технологических концентраторов, что оказывает влияние на прочностные характеристики, которое можно оценить с помощью проведения натуральных испытаний.

Нагружая цифровые модели трехслойных плит (рис. 4, 5) равномерно распределенной нагрузкой и установив критерий предел текучести как предельное состояние, соответствующее максимальным напряжениям в опасных точках, используя многофункциональный программный комплекс ANSYS, сопоставляя результаты расчета, получили, что грузоподъемность трехслойной плиты превышает в 6 раз данный показатель двухслойной.

Сопоставление результатов расчета и натурального эксперимента

Была создана цифровая модель трехслойной плиты, используя многофункциональный программный комплекс ANSYS, методом конечных элементов с выявлением мест концентрации напряжений (рис. 6), и проведены натурные испытания модели плиты (рис. 7). В контрольных точках в ходе испытаний фиксировали величину прогиба и сопоставляли с теоретическим расчетом. Экспериментом подтверждена качественная картина вертикальных перемещений плиты, полученных в расчете. Полученные результаты имеют погрешность до 50 %.

В заводских условиях изготовлена трехслойная плита размерами в плане 3000×2000 мм (сталь марки 09Г2С, толщина плиты 250 мм, толщина верхнего и нижнего листов (слоя) 20 мм). Средний слой выполнен из вертикальных листов комбинированной толщины 18 и 20 мм. Опирается плита – шарнир в углублениях со стороны нижнего листа. Равномерно распределенная внешняя нагрузка прикладывается в средней части верхнего листа согласно расчетной схеме.

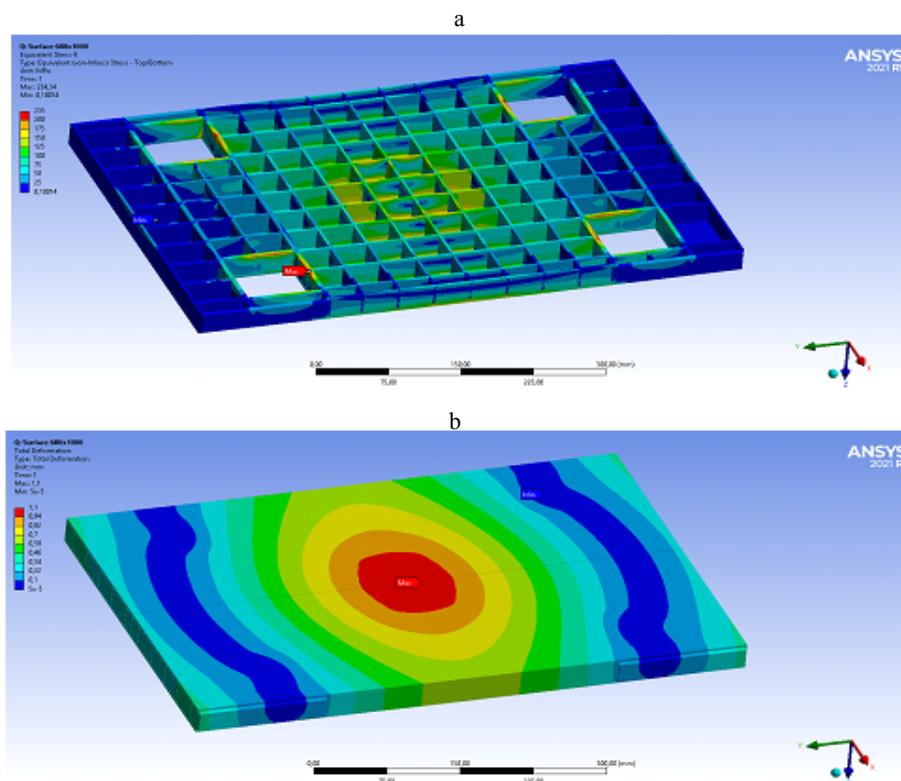


Рис. 6. Результаты конечно-элементного расчета модели трехслойной ортотропной плиты: а – распределение эквивалентных напряжений в ее ребрах и нижнем листе; б – ее вертикальные перемещения

Fig. 6. Results of finite element analysis of a three-layer orthotropic slab model: a – distribution of equivalent stresses in its ribs and bottom sheet; b – its vertical movements

В ходе выполнения работ по изготовлению трехслойной модели плиты формировали прорезные швы полного заполнения, обварили угловыми швами по периметру покрывочных листов, соединение элементов осуществлялось полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа (рис. 7). Оси прорезных швов совмещались с основными осями поперечных или продольных ребер среднего слоя, а прорезы для швов выполнялись не больше толщины ребер.

При выполнении сварочных работ возможно появление непроваров и других сварочных дефектов, которые могут инициировать зарождение трещин, которые могут оказать влияние на несущую способность конструкции при приложении нагрузки и использовании в зонах

с отрицательными температурами. Выявление трещиноопасных зон в плите – это актуальная задача, решаемая при проведении натурных испытаний с применением неразрушающего контроля, различных методов диагностики, а также с учетом конструктивных и сварочных концентраторов напряжений.

Прочность и жесткость натурной модели трехслойной плиты, напряженно-деформированное состояние ее элементов определялись расчетным анализом ее конечно-элементной модели с использованием многофункционального программного комплекса ANSYS. Поля напряжений в листах натурной модели плиты показаны на рис. 8.



Рис. 7. Изготовленная модель плиты на стадии испытаний: а – вид со стороны нижнего листа; б – модель плиты в испытательном стенде

Fig. 7. Manufactured model of the slab at the testing stage: a – view from the bottom sheet; b – model of the slab in the test bench

Характеристика напряженного состояния	Поле напряжений в элементе плиты	Максимальное значение напряжений, МПа
$\sigma_{\text{экв}}$ (верхний лист)		101
$\sigma_{\text{экв}}$ (нижний лист)		123
$\sigma_{\text{экв}}$ (средний лист)		191
σ (в швах)		97

Рис. 8. Изополя напряжений, возникающие в металлических листах плиты при приложении максимальной нагрузки (1000 кН)
Fig. 8. Stress isofields, occurring in metal plate sheets when applying maximum load (1000 kN)

Обсуждение результатов

Фактические геометрические размеры изготовленной модели плиты отличаются от твердотельной цифровой модели наличием начальных напряжений (сварочных) и начальных искривлений, вызванных внутренними напряжениями (рис. 7а). Этим можно объяснить полученные отклонения экспериментальных и расчетных величин прогибов плиты в контрольных точках. После проведения натурных испытаний выполнили визуальный осмотр плиты – разрушений прорезных швов не выявлено. Выявлены трещины, возникшие при приложении предельной нагрузки на модель плиты, только в сварных швах, по периметру покрывочной плиты.

Конструкции сварных трехслойных плит имеют значительное количество пересечений листового металла и соответственно сварных швов. Использование ручной или полуавтоматической сварки в зонах швов приводит к появлению сварочных дефектов, которые могут оказать влияние на несущую способность конструкции при приложении нагрузки и использовании в зонах с отрицательными температурами. Это требует выявления трещиноопасных зон в конструкциях плит с использованием различных методов, неразрушающего контроля и экспериментального исследования прочности конструктивных форм, содержащих конструктивные и сварочные концентраторы напряжений.

ВЫВОДЫ

1. В статье обоснована техническая возможность конструктивного исполнения стальной трехслойной ортотропной плиты большой грузоподъемности с применением электродуговой сварки.

2. Большое количество пересечений сварных швов в соединениях элементов плит требует выполнения работ приемами, ведущими к снижению сварочных деформаций и предотвращению трещинообразования в пластинах, при эксплуатации в зонах с низкими температурами и воздействием переменных нагрузок.

3. Экспериментальные исследования натурной трехслойной плиты соответствуют данным конечно-элементного расчета. Выявленные при расчете трещиноопасные зоны (пересечение сварных швов, зоны с концентраторами напряжений и др.) необходимо дополни-

тельно экспериментально исследовать на специально разработанных образцах при их квазистатическом нагружении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хьюз, О. Ф. Проектирование судовых корпусных конструкций / О. Ф. Хьюз. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
2. Мост Британия – Britannia Bridge [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikibrief.org/wiki/Britannia_Bridge.
3. Clark, E. Britannia and Conway Tabular Bridges / E. Clark. London: Thomas Telford Ltd., 1850. Vol. 1. 466 p. <https://doi.org/10.1680/tbactbwgiobaotpmuicv1.52185>.
4. The Compressive and Shear Responses of Corrugated and Diamond Lattice Materials / F. Cote [et al.] // International Journal of Solids and Structures. 2006. Vol. 43, No 20. P. 6220–6242. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.07.045>.
5. Барабанов, Н. В. Конструкция корпуса морских судов / Н. В. Барабанов. Ленинград: Судостроение, 1969. 696 с.
6. Яковлев, А. А. Стальная трехслойная ортотропная плита и ее работа при квазистатическом нагружении / А. А. Яковлев, Е. А. Мойсейчик, А. Е. Мойсейчик // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2023. Вып. 38. С. 201–206.
7. Benson, S. Compartment level progressive collapse analysis of lightweight / S. Benson, J. Downes, R. S. Dow // Marine Structures. 2013. Vol. 31. P. 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2013.01.001>.
8. Chatterjee, S. The Design of Modern Steel Bridges / S. Chatterjee. Second edition. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK, 2003. 226 p. <https://doi.org/10.1002/9780470774373>.
9. Mangus, A. R. Orthotropic Deck Bridges. Bridge Engineering Handbook / A. R. Mangus, S. Sun. CRC Press, 2000. 690 p. <https://doi.org/10.1002/9780470774373>.
10. Халиулин, В. И. Технология производства композитных конструкций / В. И. Халиулин, А. В. Шапаев. Казань: Изд-во КГТУ – КАИ, 2004. 234 с.
11. Яковлев, А. А. Расчет и испытания ортотропной плиты большой грузоподъемности [Электронный ресурс] / А. А. Яковлев // Проблемы современного строительства: сб. науч. тр., Минск, 23 мая 2023 г. / редкол.: В. В. Бондарь, В. Ф. Зверев, Е. А. Козловский. Минск: БНТУ, 2023. С. 45–58. Режим доступа: ger.bntu.by/handle/data/137752. Дата доступа: 15.11.2023.
12. Алексеев, Г. П. Справочник конструктора-машиностроителя / Г. П. Алексеев, И. С. Мазовер. Ленинград: Судпромгиз, 1961. 449 с.
13. Бельчук, Г. А. Сварные соединения в корпусных конструкциях / Г. А. Бельчук. Ленинград: Судпромгиз, 1969. 279 с.
14. Planterna, F. J. Sandwich construction / F. J. Planterna. New-York, John Wiley and Sons, Inc., 1966. 246p.
15. Kujala, P. Steel Sandwich Panels in Marine Applications / P. Kujala, A. Klanac // Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development. 2005. Vol. 56, No 4. P. 305–314.
16. Dackman, D. Steel sandwich decks in medium span bridges [Electronic Resource] / D. Dackman, W. Ek. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2015. Mode of access: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/224967/224967.pdf>.
17. Bright, S. R. A New Design for Steel Bridge Decks Using Laser Fabrication / S. R. Bright, J. W. Smith // Structural Engineer. 2007. Vol. 85, No 21. P. 49–57.

18. Caccese, V. Laser Welded Steel Sandwich Panel Bridge Deck Development: Finite Element Analysis and Stake Weld Strength Tests [Electronic Resource] / V. Caccese, S. Yorulmaz. The University of Maine, 2009. Mode of access: <https://rosap.nrl.navy.mil/view/doc/27127>.
19. Ungermann, D. Zur Dauerhaftigkeit Laserstrahlgeschweißter Stahlhohlplatten im Brückenbau / D. Ungermann, C. Rüsse // Stahlbau. 2016. Vol. 85, No 11. P. 733–739. <https://doi.org/10.1002/stab.201610428>.
20. The Stiffness of Laser Stake Welded T-Joints in Web-Core Sandwich Structures / J. Romanoff [et al.] // Thin-Walled Struct. 2007. Vol. 45, No 4. P. 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.03.008>
21. Lok, T. S. Elastic Deflection of Thin-Walled Sandwich Panel / T. S. Lok, Q. H. Cheng // Journal of Sandwich Structures & Material. 1999. Vol. 1, No 4. P. 279–298. <https://doi.org/10.1177/109963629900100403>.
22. O'Connor, D. J. Point Concentrations in Thick-Faced Sandwich Beams / D. J. O'Connor. Journal of Engineering Mechanics. 1988. Vol. 114, No 5. P. 733–752. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1988\)114:5\(733\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1988)114:5(733)).
23. Diffs, J. Multi-Scale Modelling of Corrugated Core Steel Sandwich Panels Subjected to Out-of-Plane Loads [Electronic resource] / J. Diffs, A. Ro. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017. Mode of access: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/e990543a-f3e0-4e0c-87e3-9a7ff90caad1/content>.
24. Григорьянц, А. Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных и CO₂-лазеров / А. Григорьянц, А. Грезев, В. Грезев // Фотоника. 2012. № 5 (35). С. 38–43.

Поступила 18.06.2024

Подписана в печать 20.08.2024

Опубликована онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. Hughes O. F. (1988) *Ship Structures Design*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 360 (in Russian).
2. *Britannia Bridge*. Available at: https://ru.wikibrief.org/wiki/Britannia_Bridge.
3. Clark E. (1850) *Britannia and Conway Tabular Bridges. Vol. 1*. London, Thomas Telford Ltd. 466. <https://doi.org/10.1680/tbactbwgiobaotpomuicv1.52185>.
4. Cote F., Deshpande V. S., Fleck N. A., Evans A. G. (2006) The Compressive and Shear Responses of Corrugated and Diamond Lattice Materials. *International Journal of Solids and Structures*, 43 (20), 6220–6242. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.07.045>.
5. Barabanov N. V. (1969) *Ship Hull Design*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 696 (in Russian).
6. Yakovlev A. A., Moiseychik E. A., Moiseychik A. E. (2023) Steel Three-Layer Orthotropic Plate and Its Operation under Quasi-Static Loading. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunar. nauch.-tekhn. sb* [Theoretical and Applied Mechanics. international scientific and technical collection]. Minsk, BNTU, Iss. 38, 201–206 (in Russian).
7. Benson S., Downes J., Dow R. S. (2013) Compartment Level Progressive Collapse Analysis of Lightweight. Ship Structures. *Marine Structures*, 31, 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2013.01.001>.
8. Chatterjee S. (2003) *The Design of Modern Steel Bridges*. Second edition. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK. 226. <https://doi.org/10.1002/9780470774373>.
9. Mangus A. R., Sun S. (2000) *Orthotropic Deck Bridges. Bridge Engineering Handbook*. CRC Press. 690. <https://doi.org/10.1002/9780470774373>.
10. Khaliulin V. I. Shapaev A. V. (2004) *Manufacturing Technology of Composite Structures*. Kazan, Publishing House of Kazan State Technical University – Kazan Aviation Institute. 234 (in Russian).
11. Yakovlev A. A. (2023) Calculation and Testing of Orthotropic Plate with Large Load Capacity. *Problemy sovremennogo stroitel'stva: sb. nauch. tr., Minsk, 23 maya 2023 g.* [Problems of Modern Construction: Collection of Scientific Reports, Minsk, May 23, 2023]. Minsk, BNTU, 45–58. Available at: rep.bntu.by/handle/data/137752 (accessed 15 November 2023) (in Russian).
12. Alekseev G. P., Mazover I. S. (1961) *Handbook of Mechanical Engineering Designer*. Leningrad, Sudpromgiz Publ. 449 (in Russian).
13. Belchuk G. A. (1969) *Welded Joints in Hull Structures*. Leningrad, Sudpromgiz Publ. 279 (in Russian).
14. Planterna F. J. (1966) *Sandwich Construction*. New-York, John Wiley and Sons, Inc. 246.
15. Kujala P., Klanac A. (2005) Steel sandwich Panels in Marine Applications. *Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development*, 56 (4), 305–314.
16. Dackman D., Ek W. (2015) *Steel Sandwich Decks in Medium Span Bridges*. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. Available at: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/224967/224967.pdf>.
17. Bright S. R., Smith J. W. (2007) A New Design for Steel Bridge Decks Using Laser Fabrication. *Structural Engineer*, 85 (21), 49–57.
18. Caccese V., Yorulmaz S. (2009) *Laser Welded Steel Sandwich Panel Bridge Deck Development: Finite Element Analysis and Stake Weld Strength Tests*. The University of Maine. Available at: <https://rosap.nrl.navy.mil/view/doc/27127>.
19. Ungermann D., Rüsse C. (2016) Zur Dauerhaftigkeit Laserstrahlgeschweißter Stahlhohlplatten im Brückenbau. *Stahlbau*, 85 (11), 733–739. <https://doi.org/10.1002/stab.201610428>.
20. Romanoff J., Remes H., Socha G., Jutila M., Varsta P. (2007) The Stiffness of Laser Stake Welded T-Joints in Web-Core Sandwich Structures. *Thin-Walled Structures*, 45 (4), 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.03.008>.
21. Lok T. S., Cheng Q. H. (1999) Elastic Deflection of Thin-Walled Sandwich Panel. *Journal of Sandwich Structures & Material*, 1 (4), 279–298. <https://doi.org/10.1177/109963629900100403>.
22. O'Connor D. J. (1988) Point Concentrations in Thick-Faced Sandwich Beams. *Journal of Engineering Mechanics*, 114 (5), 733–752. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1988\)114:5\(733\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1988)114:5(733)).
23. Diffs J., Ro A. (2017) *Multi-Scale Modelling of Corrugated Core Steel Sandwich Panels Subjected to Out-of-Plane Loads*. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Available at: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/e990543a-f3e0-4e0c-87e3-9a7ff90caad1/content>.
24. Grigoryants A., Grezev A., Grezev V. (2012) Laser Welding of Thick Steels Using Powerful Fiber Optic and CO₂-Lasers. *Fotonika = Photonics Russia*, (5), 38–43 (in Russian).

Received: 18.06.2024

Accepted: 20.08.2024

Published online: 29.11.2024