

УДК 62.419

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-1-43-53

ПРОЧНОСТНОЙ И ДЕФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТРЕХСЛОЙНОЙ ОРТОТРОПНОЙ ПЛИТЫ

© 2025 г.

Мойсейчик Е.А., Яковлев А.А.

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

emoisseitchik@mail.ru

Поступила в редакцию 19.06.2024

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 разработке плит большой грузоподъемности целесообразно конструктивное исполнение стальной трехслойной ортотропной плиты с применением электродуговой сварки. Показано, что большое количество пересечений сварных швов в соединениях элементов плит требует выполнения работ приемами, ведущими к снижению сварочных деформаций и предотвращению трещинообразования в плитах при действии низких температур эксплуатации, квазистатических и переменных нагрузок. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния плиты. Проведено испытание модельной и натурной плит на действие поперечных нагрузок. Установлено, что вследствие сварочных деформаций появляются отклонения фактической геометрии плиты от проектной. Этим можно объяснить различия экспериментальных и расчетных величин вертикальных перемещений. При испытании плиты не было выявлено разрушений прорезных швов, примененных для соединения элементов. Трещины при предельной нагрузке на модель плиты появлялись только в сварных швах, расположенных по периметру покрывочной плиты. Установлено, что сварная трехслойная плита имеет пересечения сварных швов, в которых зарождаются трещины. Это требует выявления трещиноопасных зон в плитах с использованием методов неразрушающего контроля и экспериментального исследования прочности конструктивных форм, содержащих конструктивные и сварочные концентраторы напряжений.

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

Введение

Трехслойная плита представляет собой систему, состоящую из двух внешних листов и среднего слоя. Внешние слои, так же как в балках, в основном воспринимают изгибающие, а средний слой – поперечные усилия. Средний слой часто выполняется в форме конструкции, соединенной с внешними листами и состоящей из периодических замкнутых ячеек, повторяющихся конструкций других форм. Средний слой наряду с восприятием усилий обеспечивает устойчивость внешних листов в зонах их сжатия и местную жесткость конструкции при действии сосредоточенных усилий.

Опыт эксплуатации трехслойных плит выявил их высокую эффективность, достоинства и некоторые недостатки [1–9]. Трехслойная плита имеет повышенные изгибную жесткость при малом весе и сопротивление кручению. Внешние слои можно изготавливать из более прочных, чем средние, материалов. Способность среднего слоя воспринимать нагрузку зависит от его конструкции и жесткостных характеристик. Опыт эксплуатации судостроительных объектов с применением трехслойных плит и оболочек также подтвердил их высокую эффективность [1]. Кроме судостроения, трехслойная плитная конструкция была впервые применена английским инженером Р. Стефенсоном [1–3] при строительстве моста «Британия». На рис. 1 изображены: *а* – трубчатый мост «Британия» (1846–1970) [2], *б* – вид пролетного строения моста [3], *в* – монтажная секция моста [2]. Пролетные строения моста изготавливались в форме трубы прямоугольного сечения из кованого листового железа толщиной 16 мм. Ширина трубы 4,5 м. Листы сопрягались заклепочными соединениями. Пролетные балки изготавливались последовательным их наращиванием из отдельных секций (рис. 1*в*). Коробчатая форма и применение трехслойных плит для верхнего и нижнего поясов балки обеспечили балке высокую изгибную, крутильную жесткость и ее прочность в течение более 120 лет [3].

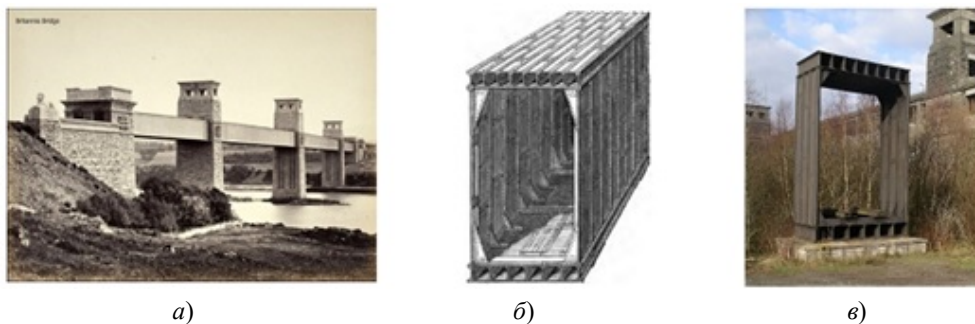


Рис. 1. Металлические конструкции трубчатого моста «Британия»

В статье [4] проведено сравнение данных экспериментальных испытаний трехслойных металлических плит со средним слоем из гофр с результатами численных и аналитических расчетов напряженно-деформированного состояния. Оказалось, что конечно-элементные расчеты лучше всего согласуются с экспериментальными измерениями. Результаты аналитических расчетов прочности превышали соответствующие экспериментальные величины.

Технологически средний слой выполнялся с сочленением листовых элементов посредством прорезей, выполненных электроэрозионной резкой, и последующей пайкой в вакуумной печи в среде аргона.

Впоследствии трехслойные облегченные конструкции широко использовались в разнообразных строительных, транспортных, авиационных, космических и других объектах [5–23]. Конструкции находят применение и в виде плит, опирающихся на упругое основание и нагруженных большими распределенными и сосредоточенными силами (элементы карьерных самосвалов, взрывозащитные ворота и др.) [6]. Для таких инженерных систем плиты должны иметь небольшую толщину при больших нагрузках и разнообразных опираниях. При разработке конструктивного решения среднего слоя плиты необходимо особое внимание уделять его технологичности [10]. Особенности производства составляющих трехслойной ортотропной плиты оказывают существенное влияние на выбор конструкции слоев и работоспособность плиты. Анализ современных способов получения трехслойных панелей из алюминиевых сплавов представлен в [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.

Цель настоящей статьи – расчетно-экспериментальное обоснование конструктивного решения стальной ортотропной плиты большой грузоподъемности и минимальной толщины, соединения элементов которой выполнены электродуговой сваркой.

Обоснование конструктивного решения

Конструктивное решение проводится в два этапа: на первом этапе разрабатывается и исследуется модель плиты, а на втором – натурная конструкция с учетом результатов испытаний ее модели [6, 11]. Предполагается, что натурная плита будет работать на восприятие больших нагрузок (до 2000 кН/м²) при небольшой относительной высоте ($h/L \approx 1/20$ – $1/40$). Возникающие в плите при таких нагрузках изгибающие моменты и поперечные усилия будут иметь значительные величины. В этом случае слои плиты (внешние и средний) должны быть выполнены из достаточно прочных материалов (металлические листы и др.). Кроме этого, соединения слоев, воспринимающие сдвигающие усилия, должны обеспечивать требуемую прочность и быть технологичными в изготовлении (например, сварными). Названным условиям может удовлетворять компоновочная схема ортотропной плиты, представленная на рис. 2, где 1 – нижний слой; 2 – средний слой; 3 – верхний слой (покрывочный). Наиболее близким аналогом приведенной на рис. 2 схемы плиты являются некоторые судостроительные корпусные конструкции (двойное днище и др. [5]). Однако их толщина не менее чем в 4–5 раз превышает высоту рассматриваемой плиты.

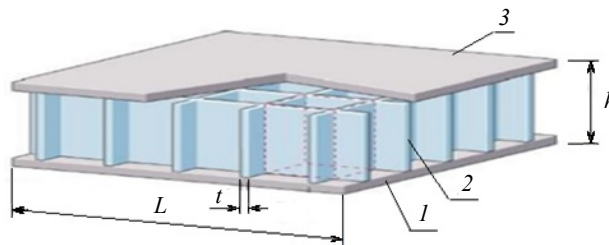


Рис. 2. Схема стальной трехслойной ортотропной плиты с прямоугольными ячейками в среднем слое

Для конструктивного исполнения за основу примем стальную ортотропную плиту со сварочными соединениями. Твердотельная модель такой плиты с размерами

600×400×30 мм со схемой приложения внешней равномерно распределенной нагрузки представлена на рис. 3, а конечно-элементная модель – на рис. 4. Размер ячейки конечного элемента (КЭ) 10 мм. Распределенная внешняя нагрузка прикладывается в средней части верхней плиты. Опирапия плиты шарнирные в углублениях со стороны нижней плиты.

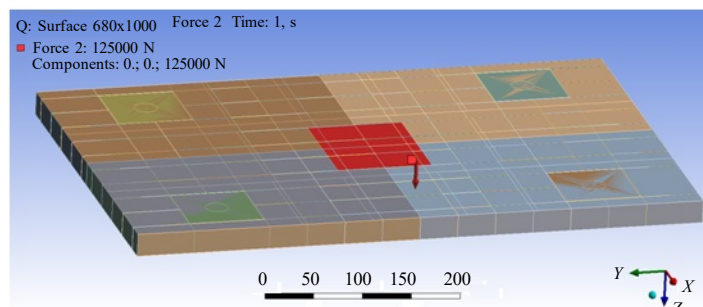


Рис. 3. Трехмерная твердотельная модель трехслойной ортотропной плиты

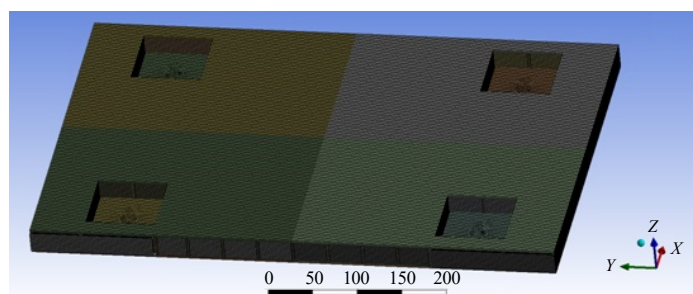


Рис. 4. Конечно-элементная модель трехслойной ортотропной плиты

В современном мостостроении широко применяется ортотропный стальной настил проезжей части. Такой настил представляет собой плоский лист, подкрепленный системой взаимно перпендикулярных пластинчатых ребер, который можно рассматривать как двухслойную ортотропную плиту. На рис. 5 представлена модель двухслойной ортотропной плиты с размерами и расположением ребер, аналогичными параметрам для среднего слоя плиты, показанной на рис. 4.

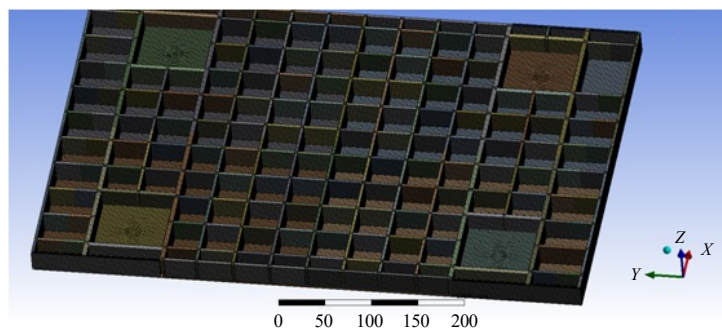


Рис. 5. Конечно-элементная модель двухслойной ортотропной плиты размерами 600×400×27 мм

При изготовлении плиты, показанной на рис. 5, все технологические требования несложно выполнить. При изготовлении трехслойной плиты (см. рис. 4) проблемы возникают с приваркой покрывочной плиты (см. рис. 2). В этом случае приварка возможна с использованием прорезных швов полного заполнения [12] и обварки угловыми швами по периметру покрывочного листа. При этом оси прорезных швов должны совпадать с осями продольных или поперечных ребер среднего слоя, а размеры прорезей под швы должны быть не больше толщины ребер t . Такая трехслойная плита содержит ряд конструктивных и технологических концентраторов, влияние которых на прочность можно изучить экспериментально.

Нагружая модели плит (см. рис. 4 и рис. 5) местной распределенной нагрузкой и принимая за предельное состояние достижение максимальными напряжениями в опасных точках предела текучести материала, можно убедиться, что грузоподъемность трехслойной плиты превышает грузоподъемность двухслойной плиты примерно в 6 раз.

Результаты конечно-элементного моделирования и эксперимента

Для трехслойной модели плиты размерами $600 \times 400 \times 30$ мм опасные зоны выявлялись конечно-элементным расчетом (рис. 6) и экспериментальным нагружением модели плиты (рис. 7). В процессе испытаний сопоставлялись прогибы модельной плиты по результатам расчета и испытаний.

На рис. 6 показано: *a* – распределение эквивалентных напряжений в ребрах и нижнем листе трехслойной плиты; *б* – вертикальные перемещения плиты.

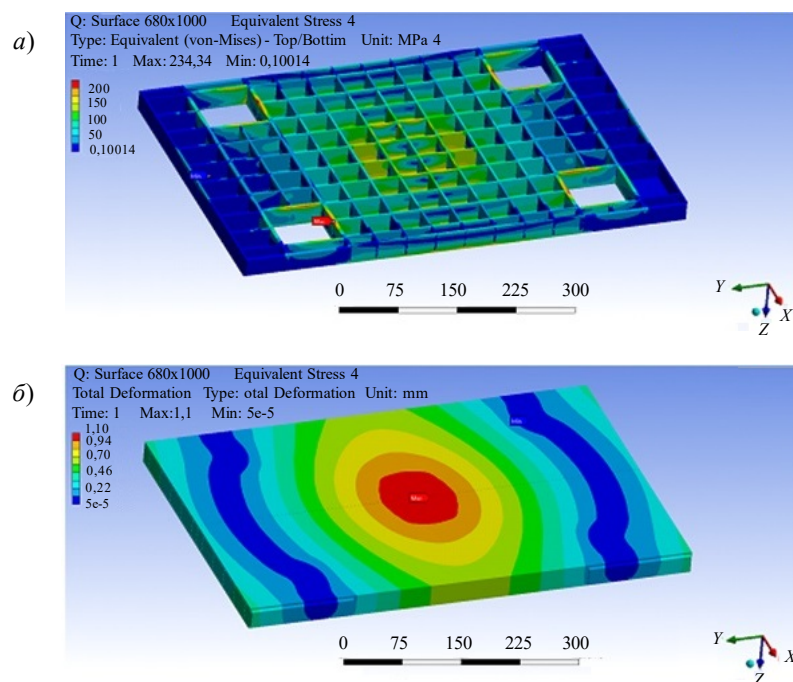
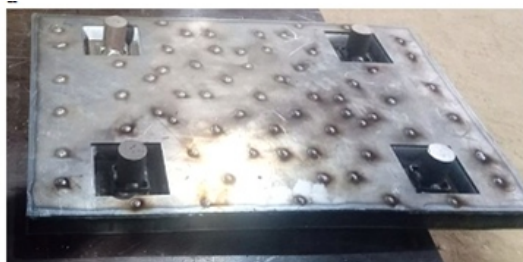


Рис. 6. Результаты конечно-элементного расчета модели трехслойной ортотропной плиты

На рис. 7 представлено: *a* – вид модели плиты со стороны нижнего листа; *б* – модель плиты в испытательном стенде. Экспериментом подтверждена качественная картина вертикальных перемещений физической модели плиты (см. рис. 7), полученных

в расчете (без учета сварочных перемещений). Максимальное расчетное перемещение в центре модельной плиты составляет 8,6 мм. Численные величины расчетных и экспериментальных перемещений отличались до 50%. При этом большие отклонения проявлялись в начальной стадии нагружения. После выработки зазоров в опорах модельной плиты (из-за сварочных перемещений) расхождения расчетных и экспериментальных вертикальных перемещений модели плиты в зоне приложения нагрузки (см. рис. 3) уменьшались до 15%.



а)



б)

Рис. 7. Плита на стадии испытаний

Общий вид натурной трехслойной плиты показан на рис. 8.



Рис. 8. Натурная плита размером в плане 2000×3000 мм перед испытанием

Материал модели и натурной ортотропной плиты – сталь марки 09Г2С. Механические характеристики принимались по данным завода-изготовителя и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные механические характеристики стали

Марка стали	Механические свойства				
	Модуль Юнга, МПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность стали, кг/м ³
Лист, 09Г2С	214000	305	460	0,3	7850

Размеры плиты в плане – 3000×2000 мм, толщина плиты 250 мм, толщина верхнего и нижнего слоев по 20 мм. Средний слой набран из листовых элементов толщиной 18 и 20 мм. Опираения плиты шарнирные в углублениях со стороны нижней плиты. Распределенная внешняя нагрузка к натурной плите прикладывается в средней части верхнего покрывочного листа.

При изготовлении трехслойной плиты соединение элементов выполнено полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа с формированием прорезных швов полного заполнения и обварки угловыми швами по периметру покрывочных листов. При этом оси прорезных швов совмещались с осями продольных или поперечных ребер среднего слоя, а прорезы под швы выполнялись размером не больше толщины ребер.

Прочность натурной трехслойной плиты, напряженно-деформированное состояние ее элементов определялось расчетным анализом конечно-элементной модели. Расположение опасных зон и максимальные напряжения в них приведены на рис. 9.

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
$\sigma_{\text{экв}}$ (в швах)		97

Рис. 9. Поля напряжений и наибольшие напряжения в элементах плиты при максимальной нагрузке 1000 кН

Наибольший прогиб натурной плиты в точке под нагрузкой не превышал 1 мм, что соответствовало расчету.

Обсуждение результатов

Фактическая геометрия изготовленной модели отличалась от твердотельной наличием начальных напряжений (сварочных) и начальных искривлений, вызванных внутренними напряжениями. Этим можно объяснить различия экспериментальных и

расчетных величин вертикальных перемещений. При испытании не было выявлено разрушений прорезных швов. Трещины при предельной нагрузке на модель появлялись только в сварных швах, расположенных по периметру покрывочной плиты. Конструкции сварных трехслойных плит имеют многочисленные пересечения сварных швов. При сварке в зонах швов вероятно появление сварочных дефектов, которые могут инициировать зарождение трещин в натурных плитах при низких температурах, переменных нагрузках. Это требует выявления трещиноопасных зон в плитах с использованием методов неразрушающего контроля и экспериментального исследования прочности конструктивных форм, содержащих конструктивные и сварочные концентраторы напряжений.

Заключение

1. В статье обоснована 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 элементах плит при действии низких температур и переменных нагрузок.

3. Экспериментальные исследования натурной трехслойной плиты соответствуют результатам КЭ расчета. Выявленные при расчете трещиноопасные зоны (пересечение сварных швов, зоны с концентраторами напряжений и др.) необходимо дополнительно экспериментально исследовать на специально разработанных образцах при их квазистатическом нагружении.

Список литературы

1. Хьюз О.Ф. *Проектирование судовых корпусных конструкций: комплексный оптимизационный подход, ориентированный на применение ЭВМ*. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
2. *Мост Британия*. https://ru.wikibrief.org/wiki/Britannia_Bridge.
3. Clark E. *Britannia and Conway Tabular Bridges*. London, 1849. 55 p. http://books.google.com/books?id=_GsOAAAAYAAJ&oe=UTF-8.
4. Cote F., Deshpande V.S., Fleck N.A., Evans A.G. The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43. Iss. 20. P. 6220–6242. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.07.045>.
5. Барабанов Н.В. *Конструкция корпуса морских судов*. Л.: Судостроение, 1969. 696 с.
6. Яковлев А.А., Мойсейчик Е.А., Мойсейчик А.Е. Стальная трехслойная ортотропная плита и ее работа при квазистатическом нагружении. *Теоретическая и прикладная механика: Международный научно-технический сборник*. 2023. Вып. 38. С. 201–206.
7. Benson S., Downes J., Dow R.S. Compartment level progressive collapse analysis of lightweight ship structures. *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*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd., 2003. 224 p.
9. Mangus A.R., Sun S. *Orthotropic Deck Bridges. Bridge Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 690 p.
10. Халиулин В.И., Шапаев А.В. *Технология производства композитных конструкций*. Казань: Изд-во КГТУ, 2004. 234 с.
11. Яковлев А.А. Расчет и испытания ортотропной плиты большой грузоподъемности. *Проблемы современного строительства: Сб. научных докладов [Электронный ресурс]*.

Минск, 23 мая 2023 г. Минск, 2023. С. 45–58. Режим доступа: rep.bntu.by/handle/data/137752. Дата доступа: 15.11.2023.

12. Алексеев Г.П., Мазовер И.С. *Справочник конструктора-машиностроителя (формулы и расчеты)*. Л.: Судпромгиз, 1961. 449 с.

13. Бельчук Г.А. *Сварные соединения в корпусных конструкциях*. Л.: Судпромгиз, 1969. 279 с.

14. Planterna F.J. *Sandwich Construction*. New York: John Wiley and Sons, 1966. 246 p.

15. Kujala P., Klanac A. Steel sandwich panels in marine applications. *Brodogradnja*. 2005. Vol. 56. Iss. 4. P. 305–314. <https://www.researchgate.net/publication/27186834>.

16. Dackman D., Ek W. *Steel Sandwich Decks in Medium Span Bridges*. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2015. 145 p. <https://www.researchgate.net/publication/27186834>.

17. Bright S.R., Smith J.W. A new design for steel bridge decks using laser fabrication. *The Structural Engineer*. 2007. Vol. 85. Iss. 21. P. 49–57.

18. Caccese V., Yorulmaz S. Laser welded steel sandwich panel bridge deck development: finite element analysis and stake weld strength tests. *Engineering. Materials Science. Final Report*. 2009. 106 p.

19. Ungermann D., Rüsse C. Zur Dauerhaftigkeit laserstrahlgeschweißter Stahlhohlplatten im Brückenbau. *Stahlbau*. 2016. Vol. 85. No 11. P. 733–739. <https://doi.org/10.1002/stab.201610428>.

20. Romanoff J., Remes H., Socha G., Jutila M., Varsta P. The stiffness of laser stake welded T-joints in web-core sandwich structures. *Thin-Walled Structures*. 2007. Vol. 45. Iss. 4. P. 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.03.008>.

21. Lok T.S., Cheng Q.H. Elastic deflection of thin-walled sandwich panel. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 1999. Vol. 1. Iss. 4. P. 279–298. <https://doi.org/10.1177/109963629900100403>.

22. O'Connor D.J. Point concentrations in thick-faced sandwich beams. *Journal of Engineering Mechanics*. 1988. Vol. 114. Iss. 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., Ro A. *Multi-Scale Modelling of Corrugated Core Steel Sandwich Panels Subjected to out-of-Plane Loads*. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2017. 67 p.

24. Григорьянц А., Грезев А., Грезев В. Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных и CO₂-лазеров. *Фотоника*. 2012. №5 (35). С. 38–43.

References

1. Hughes O.F. *Ship Structures Design: A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach*. New York. London. Wiley-Interscience. 1983. 566 p.

2. *Britannia Bridge*. https://ru.wikibrief.org/wiki/Britannia_Bridge.

3. Clark E. *Britannia and Conway Tabular Bridges*. London. 1849. 55 p.

4. Cote F., Deshpande V.S., Fleck N.A., Evans A.G. The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials. *Int. J. Solids Struct.* 2006. Vol. 43. Iss. 20. P. 6220–6242. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.07.045>.

5. Barabanov N.V. *Konstruktsiya korpusa morskikh sudov [Design of the Hull of Seagoing Vessels]*. Leningrad. Sudostroenie Publ. 1969. 696 p. (In Russian).

6. Yakovlev A.A., Moyseychik E.A., Moyseychik A.E. Stalnaya trekhsloynnaya ortotropnaya plita i ee rabota pri kvazistaticheskom nagruzhении [Steel three-layer orthotropic plate and its work under quasi-static loading]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskij sbornik [Theoretical and Applied Mechanics]*. 2023. Iss. 38. P. 201–206 (In Russian).

7. Benson S., Downes J., Dow R.S. Compartment level progressive collapse analysis of lightweight ship structures. *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*. Oxford, UK. Blackwell Science Ltd. 2003. 224 p.

9. Mangus A.R., Sun S. *Orthotropic Deck Bridges. Bridge Engineering Handbook*. Boca Raton. CRC Press. 2000. 690 p.
10. Khaliulin V.I., Shapaev A.V. *Tekhnologiya proizvodstva kompozitnykh konstruktсий* [Technology of Production of Composite Structures]. Kazan. KGTU Publ. 2004. 234 p. (In Russian).
11. Yakovlev A.A. Raschet i ispytaniya ortotropnoy plity bolshoy gruzopodemnosti [Calculation and testing of orthotropic slab with large lifting capacity]. *Problemy sovremennogo stroitelstva: Sbornik nauchnykh dokladov* [Elektronnyy resurs]. [Problems of Modern Construction: Collection of Scientific Reports [Electronic resource]]. Minsk, 23 May 2023 g. Rezhim dostupa: rep.bntu.by/handle/data/137752. Data dostupa: 15.11.2023 [Access mode: rep.bntu.by/handle/data/137752. Access date: 15.11.2023]. Minsk. 2023. P. 45–58 (In Russian).
12. Alekseev G.P., Mazover I.S. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya (formuly i raschety)* [Handbook of the Mechanical Engineer (Formulas and Calculations)]. Leningrad. Sudpromgiz Publ. 1961. 449 p. (In Russian).
13. Belchuk G.A. *Svarnye soedineniya v korpusnykh konstruktsiyakh* [Welded Joints in Hull Structures]. Leningrad. Sudpromgiz Publ. 1969. 279 p. (In Russian).
14. Planterna F.J. *Sandwich Construction*. New York. John Wiley and Sons. 1966. 246 p.
15. Kujala P., Klanac A. Steel sandwich panels in marine applications. *Brodogradnja*. 2005. Vol. 56. Iss. 4. P. 305–314. <https://www.researchgate.net/publication/27186834>.
16. Dackman D., Ek W. *Steel Sandwich Decks in Medium Span Bridges*. Göteborg, Sweden. Chalmers University of Technology. 2015. 145 p. <https://www.researchgate.net/publication/27186834>.
17. Bright S.R., Smith J.W. A new design for steel bridge decks using laser fabrication. *The Structural Engineer*. 2007. Vol. 85. Iss. 21. P. 49–57.
18. Caccese V., Yorulmaz S. Laser welded steel sandwich panel bridge deck development: finite element analysis and stake weld strength tests. *Engineering. Materials Science. Final Report*. 2009. 106 p.
19. Ungermann D., Rüsse C. Zur Dauerhaftigkeit laserstrahlgeschweißter Stahlhohlplatten im Brückenbau. *Stahlbau*. 2016. Vol. 85. No 11. P. 733–739. <https://doi.org/10.1002/stab.201610428>.
20. Romanoff J., Remes H., Socha G., Jutila M., Varsta P. The stiffness of laser stake welded T-joints in web-core sandwich structures. *Thin-Walled Structures*. 2007. Vol. 45. Iss. 4. P. 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.03.008>.
21. Lok T.S., Cheng Q.H. Elastic deflection of thin-walled sandwich panel. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 1999. Vol. 1. Iss. 4. P. 279–298. <https://doi.org/10.1177/109963629900100403>.
22. O'Connor D.J. Point concentrations in thick-faced sandwich beams. *Journal of Engineering Mechanics*. 1988. Vol. 114. Iss. 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., Ro A. *Multi-Scale Modelling of Corrugated Core Steel Sandwich Panels Subjected to Out-of-Plane Loads*. Gothenburg, Sweden. Chalmers University of Technology. 2017. 67 p.
24. Grigorianz A., Grezev A., Grezev V. Lazernaya svarka staley bolshikh tolshchin s primeneniem moshchnykh optovolokonnykh i CO₂-lazerov [Laser welding large thickness steels with high-power fibre-optic and CO₂ laser]. *Fotonika* [Photonics Russia]. 2012. No 5 (35). P. 38–43 (In Russian).

STRENGTH AND DEFORMATION ANALYSIS OF A THREE-LAYER ORTHOTROPIC PLATE

Moiseychik E.A., Yakovlev A.A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

emoisseitchik@mail.ru

Received by the Editor 2024/06/19

The article 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 of connecting the elements in the structure. The use of laser welding for connections is effective for connecting 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, when developing slabs with a large load-bearing capacity, it is advisable to design a steel three-layer orthotropic slab using electric arc welding. It is shown that a large number of intersections of welded seams in the joints of elements of such slabs requires performing work using techniques that reduce welding deformations and prevent cracking in such slabs under low operating temperatures, quasi-static and variable loads. The stress-strain state analysis of the slab has been completed. The model and full-scale slabs are tested for transverse loads. It is found that due to welding deformations, deviations of the actual geometry of the slab from the design one appear. This can explain the differences in the experimental and calculated values of vertical displacements. No failures of the slotted welds used to connect the elements were detected during the slab testing. Cracks at the maximum load on the slab model appeared only in the welds located along the perimeter of the cover slab. It was found that the welded 3-layer slab has intersections of welds in which cracks originate. This requires identifying crack-hazardous zones in the slabs using non-destructive testing methods and experimental research into the strength of structural forms containing structural and welding stress concentrators.

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