

СТАЛЬНАЯ ТРЕХСЛОЙНАЯ ОРТОТРОПНАЯ ПЛИТА И ЕЕ РАБОТА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Яковлев А. А., Мойсейчик А. Е., Мойсейчик Е. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск

Введение. Трехслойная плита представляет собой систему, состоящую из двух внешних листов и среднего слоя. Внешние слои также 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. Средний слой наряду с восприятием усилий обеспечивает устойчивость внешних листов в зонах их сжатия. Такая трехслойная плита имеет повышенное сопротивление кручению. Внешние слои можно изготавливать из более прочных, чем средние, материалов.

Достоинством трехслойных плит является их способность при относительно малом весе обеспечивать повышенную жесткость плиты на изгиб и кручение. Опыт эксплуатации судостроительных объектов с применением трехслойных плит и оболочек показал высокую эффективность таких конструкций [1]. Вне судостроения трехслойная плитная конструкция была впервые применена английским инженером Р. Стефенсоном при строительстве моста «Британия» (рисунок 1, а).

Пролетные строения моста изготавливались в форме трубы прямоугольного сечения из ковального листового железа толщиной 16 мм. Ширина трубы 4,5 м. Листы сопрягались заклепочными соединениями. Пролетные балки изготавливались последовательным их наращиванием из отдельных секций (см. рисунок 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].

Впоследствии трехслойные облегченные конструкции широко использовались в разнообразных строительных, транспортных, авиационных, космических и других объектах. 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.). Для таких инженерных систем плиты должны иметь небольшую толщину при больших нагрузках и разнообразных опираниях.

Целью настоящей статьи является расчетно-экспериментальное обоснование конструктивного решения стальной ортотропной плиты минимальной толщины с учетом технологических ограничений.

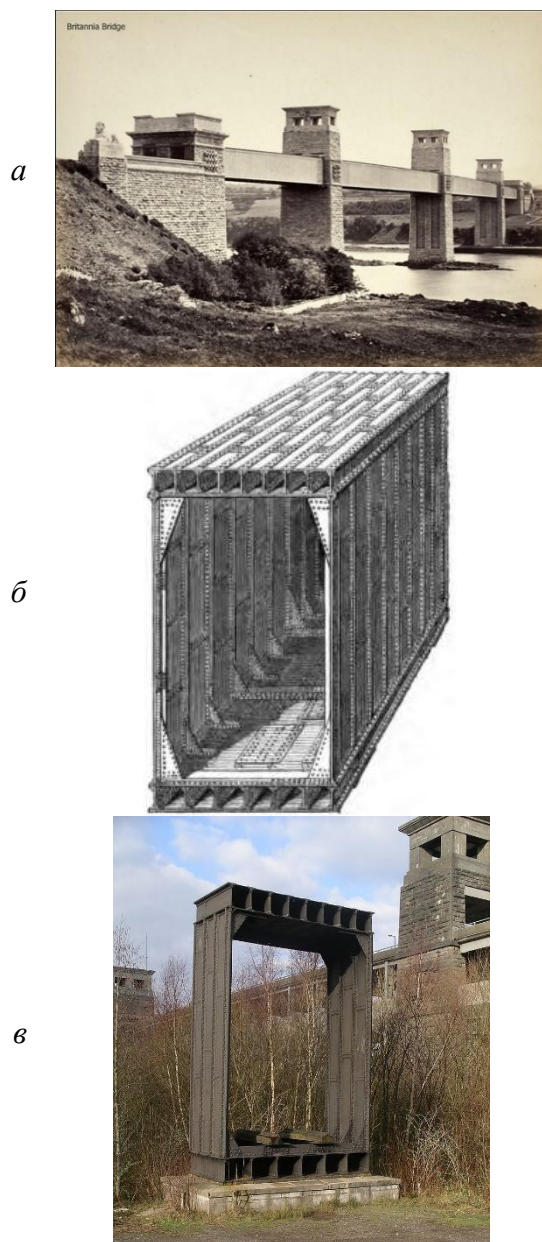


Рис. 1. Металлические конструкции трубчатого моста «Британия»: *а* – трубчатый мост «Британия» (1846 – 1970) [2]; *б* – вид пролетного строения моста [3]; *в* – монтажная секция моста [2]

Обоснование конструктивного решения.

Предполагается, что плита будет работать на восприятие больших нагрузок (до 1000 кН/м^2) 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 рисунке 2. Наиболее близким аналогом приведенной на рисунке 2 схемы плиты являются некоторые судостроительные корпусные конструкции (двойное днище и др. [4]). Однако их высота h не менее чем в 4–5 раз больше рассматриваемой плиты.

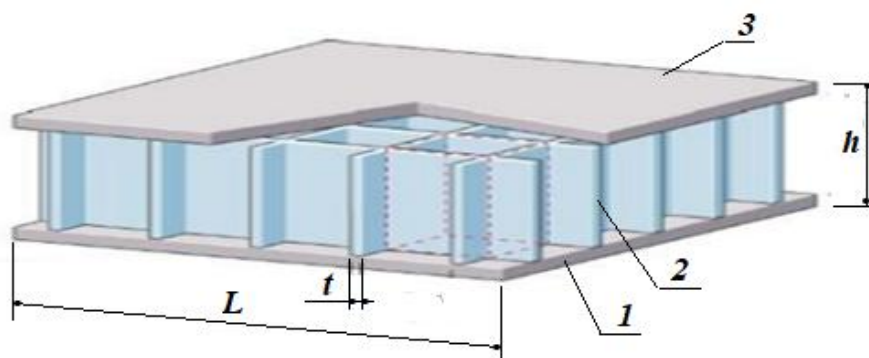


Рис. 2. Схема стальной трехслойной ортотропной плиты с прямоугольными ячейками в среднем слое: 1 – нижний слой; 2 – средний слой; 3 – верхний слой (покрывочный)

Для конструктивного исполнения примем стальную ортотропную плиту с соединениями на сварке. Твердотельная модель такой плиты представлена на рисунке 3, а конечно-элементная – на рисунке 4. Распределенная внешняя нагрузка к такой плите прикладывается в средней части верхней плиты. Опираения плиты шарнирные, в углублениях со стороны нижней плиты.

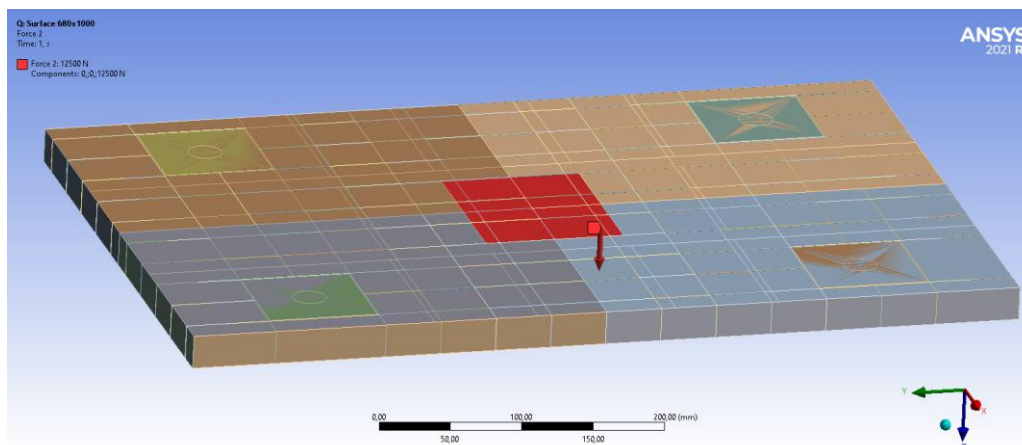


Рис. 3. Трехмерная твердотельная модель 3-слойной ортотропной плиты размерами 600×400×30 со схемой приложения внешней равномерно распределенной нагрузки

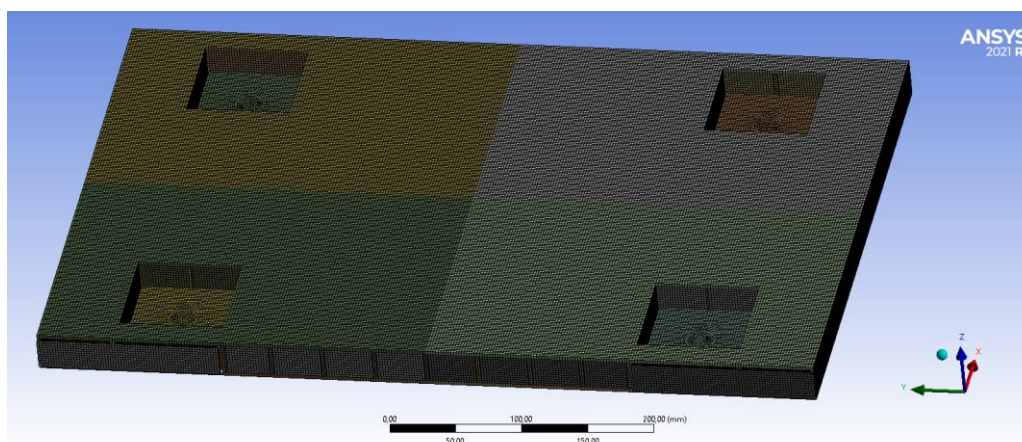


Рис. 4. Конечно-элементная модель 3-слойной ортотропной плиты размерами 600×400×30

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

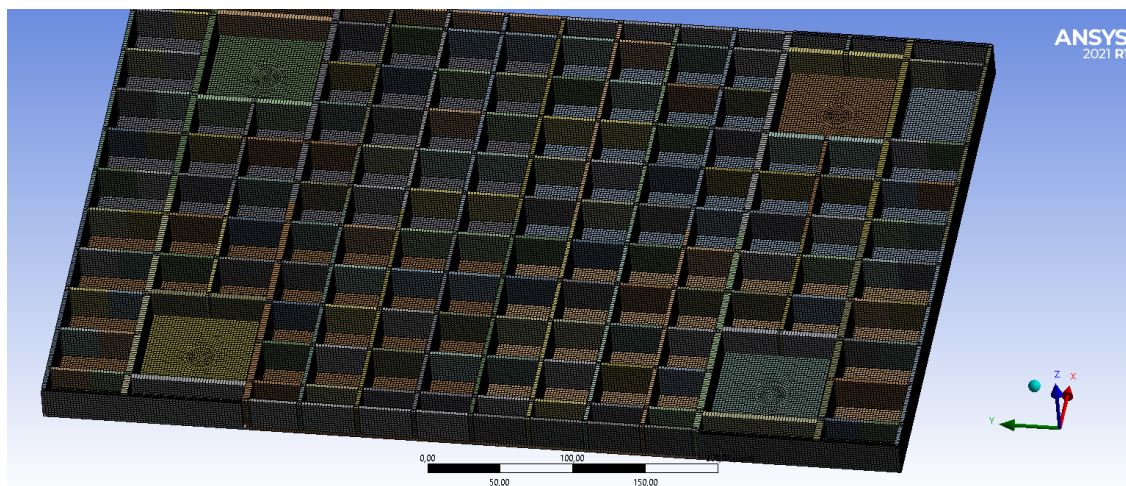


Рис. 5. Конечно-элементная модель 2-хслойной ортотропной плиты размерами 600×400×27

При изготовлении плиты по рисунку 5 все технологические требования несложно выполнить. При изготовлении 3-хслойной плиты (рисунок 4) проблемы возникают с приваркой покрывочной плиты (рисунок 2). В этом случае приварка возможна с использованием прорезных швов полного заполнения [5] и обварки угловыми швами по периметру покрывочного листа. При этом оси прорезных швов должны совпадать с осями продольных или поперечных ребер среднего слоя, а прорезы под швы должны быть не больше толщины t ребер. Такая трехслойная плита содержит ряд конструктивных и технологических концентраторов, влияние которых на прочность можно изучить экспериментальным путем

Нагружая модели плит (см. рисунок 4 и 5) распределенной нагрузкой и принимая за предельное состояние достижение максимальными напряжениями в опасных точках предела текучести материала, можно по данным расчета в программе ANSYS убедиться, что грузоподъемность трехслойной плиты превышает соответствующую для 2-хслойной плиты примерно в 6 раз.

Данные конечно-элементного моделирования и эксперимента.

Для трехслойной плиты опасные зоны выявлялись конечно-элементным расчетом по программе ANSYS (рисунок 6) и экспериментальным нагружением модели плиты (рисунок 7). В процессе испытаний сопоставлялись прогибы модельной плиты по данным расчета и испытаний. Экспериментом подтверждена качественная картина вертикальных перемещений плиты, полученных в расчете.

Численные величины расчетных и экспериментальных перемещений отличались до 50 %.

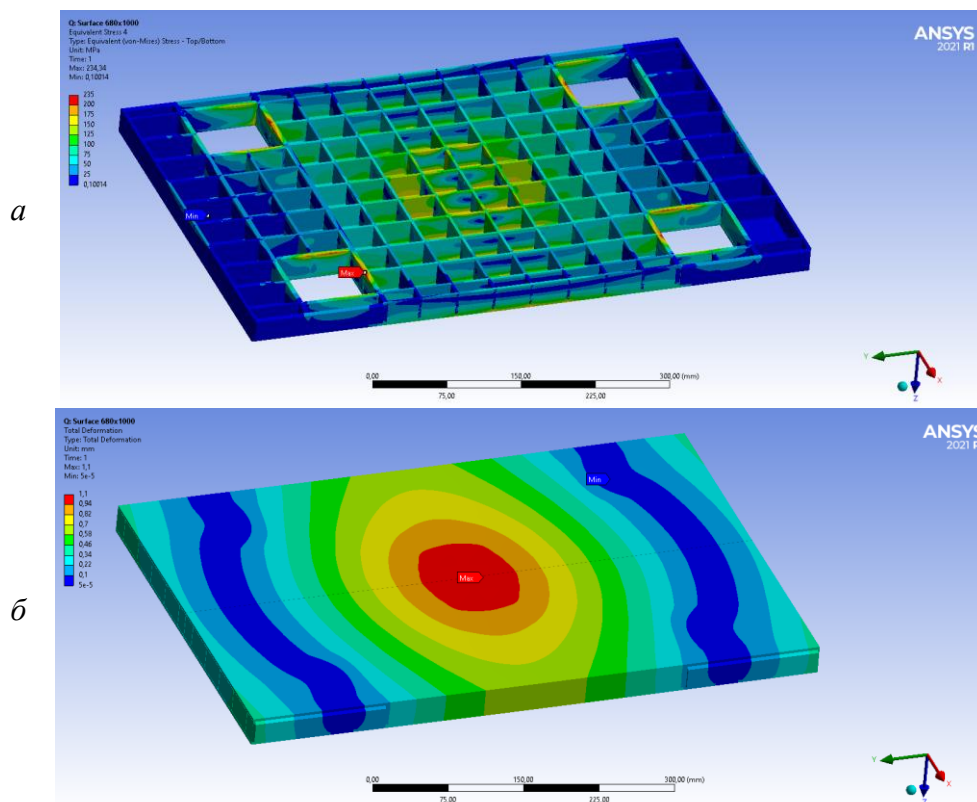
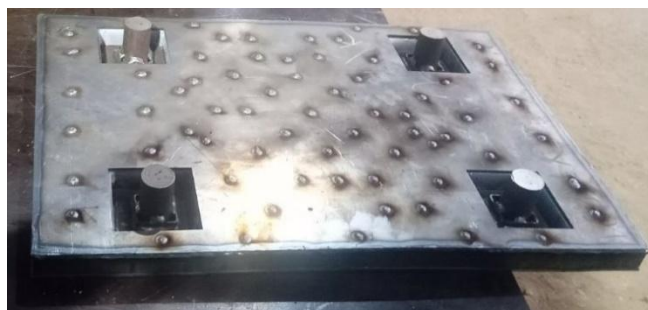


Рис. 6. Результаты конечно-элементного расчета модели 3-хслойной ортотропной плиты: *а* – распределение эквивалентных напряжений в ребрах и нижнем листе плиты 3-хслойной плиты; *б* – вертикальные перемещения плиты 3-хслойной плиты



а

б

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

Обсуждение результатов. Фактическая геометрия изготовленной модели отличалась от твердотельной наличием начальных напряжений (сварочных) и начальных искривлений, вызванных внутренними напряжениями (рисунок 7, *а*). 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 кровельной плиты.

Конструкции сварных 3-хслойных плит имеют многочисленные пересечения сварных швов. При ручной или полуавтоматической сварке в зонах швов вероятно по-

явление 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 [6].

Выводы.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хьюз О. Ф. Проектирование судовых корпусных конструкций. – Л. : Судостроение, 1988. – 360 с.
2. Мост Британия - Britannia Bridge. – https://ru.wikibrief.org/wiki/Britannia_Bridge.
3. Clark, E. Britannia and Conway Tabular Bridges/Edwin Clark. – London, 1849. – 55 p. – http://books.google.com/books?id=_GsOAAAAYAAJ&oe=UTF-8.
4. Барабанов Н. В. Конструкция корпуса морских судов / Н. В. Барабанов // Ленинград : Судостроение, 1969. – 696 с.
5. Алексеев Г. П. Справочник конструктора-машиностроителя / Г. П. Алексеев И. С. Мазовер. – Ленинград : Судпромгиз, – 1961. – 449 с.
6. Бельчук Г. А. Сварные соединения в корпусных конструкциях / Г. А. Бельчук // Ленинград : Судпромгиз, 1969. – 279 с.

Поступила: 18.04.2023