

УДК 624.073:004.94

А. О. ШИМАНОВСКИЙ, И. Е. КРАКОВА

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ КОНТУРА СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ НА ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

С помощью конечно-элементного моделирования в среде программного комплекса ANSYS анализируется напряженно-деформированное состояние прямоугольных трехслойных пластин при действии равномерно распределенного давления. Задача решается в упругой постановке с учетом геометрической нелинейности. Рассматривается влияние на деформации конструкции различных вариантов шарнирного закрепления контура сэндвич-панелей при наличии жесткой диафрагмы и без нее.

Ключевые слова: сэндвич-панель, напряженно-деформированное состояние, закрепление контура.

В настоящее время трехслойные элементы конструкций находят широкое применение в различных отраслях техники, машиностроении и строительстве. Такие конструкции состоят из двух тонких высокопрочных несущих слоев и малопрочного материала заполнителя, осуществляющих совместную работу. Несущие слои выполняются из высокомодульного материала, позволяющего воспринимать основную нагрузку, а низкомодульный средний обладает высокой деформативностью. Наряду с достоинствами таких конструкций (способность выдерживать значительные нагрузки при малом весе) они имеют и некоторые недостатки, которые связаны, как правило, с технологией их производства.

Исследованию напряженно-деформированного состояния слоистых конструкций посвящено большое количество работ. Их авторы анализируют равновесие и движение стержней, пластин и оболочек под действием статических и динамических нагрузок [1]. Известны значительные достижения в данной области научного коллектива под руководством Э. И. Старовойтова, в книгах и статьях которого рассмотрены постановки различных задач механики трехслойных конструкций и разработаны пути их решения [2–4].

В работах [5, 6] исследуется несущая способность, деформирование и разрушение сэндвич-панелей при действии равномерно распределенных кратковременных и длительных нагрузок. Авторы [7] анализируют локальное напряженно-деформируемое состояние трехслойной пластины при ударных механических воздействиях. В ряде статей устанавливается влияние на напряженно-деформированное состояние трехслойных пластин технологических дефектов, связанных с непропиткой материалов и наличием вмятин [8].

В [9] выполнено сравнение аналитического и численного методов расчета трехслойных металлических панелей. Приведены результаты статических расчетов металлических панелей численным методом по различным расчет-

ным схемам. В работе [10] выполнено аналитическое и конечно-элементное решение задачи о поперечном изгибе трехслойной панели из композита с нежестким наполнителем, при условии, что две противоположные кромки панели имеют шарнирное опирание или жестко защемлены. Также получены выражения для поперечного прогиба и функции сдвига прямоугольной композитной трехслойной панели с учетом деформаций поперечного сдвига при различных соотношениях цилиндрических жесткостей несущих слоев.

В реальных условиях неподвижность сэндвич-панелей относительно основания может осуществляться с использованием различных конструктивных элементов. Так, в работе [11] получены дифференциальные уравнения для трехслойной балки с вязкоупругим сердечником для различных условий закрепления конца балки: отсутствие перемещения, отсутствие вращения, изгибающего момента, сдвига, смещения торцевой панели в конечной точке, наличие жесткой и гибкой обвязки, проходящей по контуру пластины. В статье [12] автором рассмотрено деформирование трехслойной оболочки, по боковым граням которой имеются ребра жесткости.

Проведенный анализ показывает, что при аналитических исследованиях связь трехслойного пакета с основанием рассматривается, как правило, как шарнирное соединение, причем для упрощения математических моделей шарнир размещается на считающемся жестким контуре сэндвич-панели в срединной плоскости наполнителя. Однако такое закрепление не просто осуществить на практике. В реальных условиях чаще всего панель непосредственно касается основания несущим слоем, причем жесткая диафрагма на торце панели отсутствует. Поэтому целью представленной работы является анализ влияния условий закрепления контура сэндвич-панели на ее изгиб, вызванный действием равномерно распределенного давления.

Аналитическое исследование деформирования трехслойных пластин при изменении граничных условий даже в линейно-упругой постановке требует объемных выкладок. В то же время малая толщина несущих слоев и высокая деформативность наполнителя приводит к значительным перемещениям. Поэтому требуется учет геометрической нелинейности [13]. Такая ситуация обусловила необходимость использования конечно-элементного моделирования рассматриваемой системы. Для расчетов использован пакет программ проектирования и анализа ANSYS Mechanical [14].

С целью сравнения получаемых результатов с известными, найденными аналитическим способом, в качестве объекта исследования принята прямоугольная трехслойная сэндвич-панель размером 1×1 м, находящаяся под действием равномерно распределенного давления, приложенного к верхнему несущему слою [15]. Пластина состоит из двух алюминиевых несущих слоев различной толщины, между которыми находится слой из фторопласта. Для этого в среде программного комплекса была создана конечно-элементная модель сэндвич-пластины, размеры которой указаны на рисунке 1. С учетом симметрии рассматривалась ее четверть.

Приняты следующие параметры материалов модели: для несущих слоев (алюминий Д16Т) модуль Юнга $E_1 = 72,1$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,35$, для заполнителя (фторопласт) $E_2 = 241,2$ МПа, $\nu_2 = 0,34$. Моделирование жесткой диафрагмы осуществлялось путем размещения на контуре пластины толщиной $0,005$ м, имеющей характеристики $E_3 = 2$ ГПа, $\nu_3 = 0,3$. Равномерно распределенное давление на верхний слой пластины принималось равным 2 МПа. При создании конечно-элементных моделей использован 20-узловой объемный элемент SOLID186. Общее количество элементов модели составило 64000 .

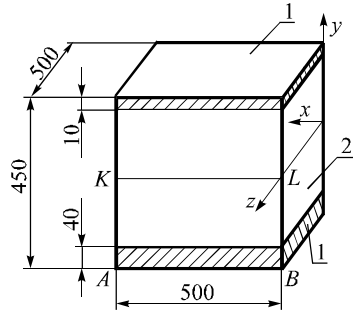


Рисунок 1 – Расчетная схема четверти сэндвич пластины

Рассматривались несколько вариантов закрепления контура сэндвич-панелей, которые представлены на рисунке 2. Для них предполагались граничные условия, соответствующие следующим связям:

- свободное опирание на ребро AB (перемещение $w = 0$);
- шарнир на нижней кромке боковой грани ($u_z = 0, w = 0$);
- шарнир в срединной плоскости заполнителя (линия KL).

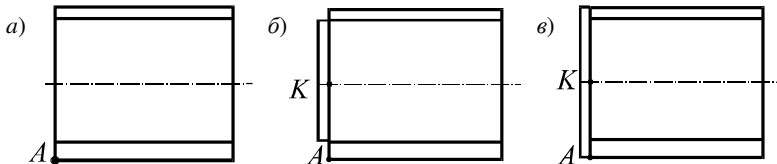


Рисунок 2 – Варианты закрепления контура пластины:

- a* – пластина без концевой диафрагмы; *б* – диафрагма, усиливающая средний слой;
в – диафрагма, жестко соединяющая три слоя

Результаты расчета в соответствии с моделью, представленной в работе [16], граничные условия в которой соответствовали одновременному опиранию торцов верхней и нижней пластин, показали, что вертикальные перемещения слоев, определенные численным методом, на $30\text{--}40\%$ больше значений, найденных аналитически. В то же время максимальные перемещения точек несущих слоев в их плоскостях отличались на порядок и более. Более подробный анализ показал, что существенные отличия в значениях продольных смещений связаны с изгибом несущих слоев, из-за значительной толщины которых поворот поперечных сечений приводил к существенной разнице между перемещениями на нижней и верхней гранях. Также следует отметить, что нелинейный расчет завершился не на первой, а на третьей итерации, следовательно, геометрическая нелинейность вносит существенный вклад в результаты расчетов.

Выполнено сравнение схем распределения деформаций в зависимости от варианта закрепления контура сэндвич панели для случая опирания на ребро AB . На рисунке 3 представлены схемы распределения деформаций для разных вариантов закрепления контура.

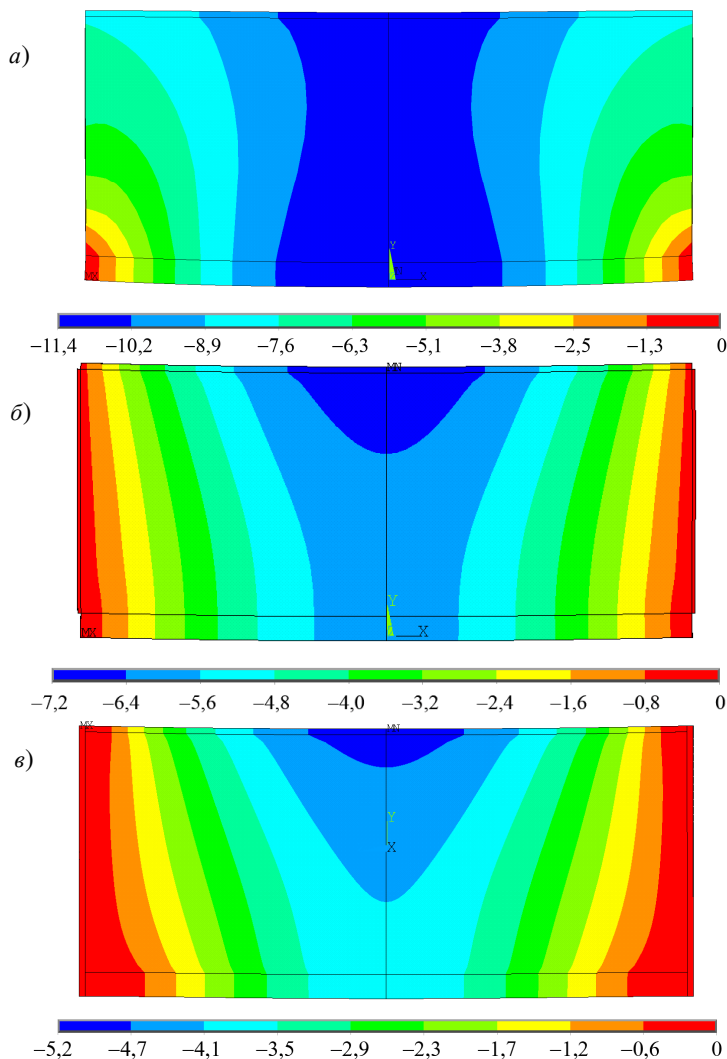


Рисунок 3 – Распределение деформаций, мм, по площади сечения для разных вариантов закрепления контура сэндвич-пластины:

- a* – пластина без концевой диафрагмы;
- б* – диафрагма, усиливающая средний слой;
- в* – диафрагма, жестко соединяющая три слоя

Приведенные схемы демонстрируют, что увеличение жесткости крепления контура при опирании пластины на основание приводит к уменьшению максимальной деформации конструкции в 2,2 раза. Аналогичный эффект наблюдается при шарнирном закреплении конструкции по ребру AB и линии KL .

Представленные на рисунке 4 графики показывают, что использование диафрагмы (см. рисунок 2, б) приводит к существенному уменьшению поперечных и продольных перемещений деформаций конструкции.

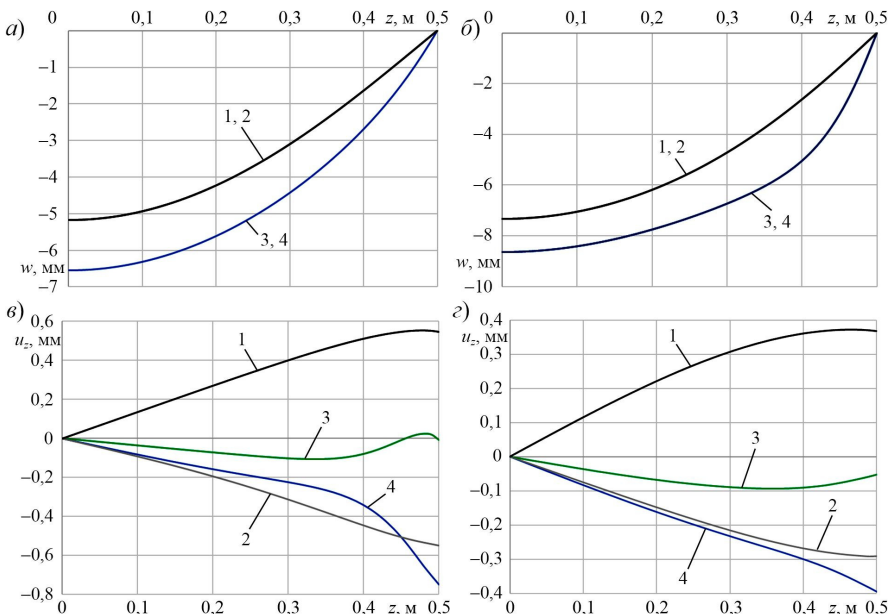


Рисунок 4 – Поперечные (а, б) и продольные (в, г) перемещения точек несущих слоев пластин без диафрагмы (а, в) и с диафрагмой (б, г):

линии 1 и 2 – нижняя и верхняя плоскости нижней пластины; 3 и 4 – то же для верхней пластины

Таким образом, выполненные расчеты показывают, что при незначительном отличии поперечных размеров трехслойной пластины от ее размеров в плане способ описания ее шарнирного закрепления либо опирания весьма существенно влияет на результаты расчетов напряженно-деформированного состояния. Поэтому при анализе реальных слоистых конструкций следует тщательно подходить к описанию граничных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Reddy, J. N. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis / J. N. Reddy. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2003. – 858 p.

2 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойных элементов конструкций на упругом основании / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, Д. В. Леоненко. – М. : Физматлит, 2006. – 378 с.

3 Старовойтов, Э. И. Трехслойные стержни в терморадационных полях / Э. И. Старовойтов, М. А. Журавков, Д. В. Леоненко. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 273 с.

4 Плескачевский, Ю. М. Механика трехслойных стержней и пластин, связанных с упругим основанием / Ю. М. Плескачевский, Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко. – М. : Физматлит, 2011. – 558 с.

5 Петров, С. М. Автоматизированное проектирование и расчёт трёхслойных панелей с учётом силового и температурного воздействия / С. М. Петров // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2013. – № 1. – С. 23–28.

6 Петрова, Е. А. К определению разрушающих нагрузок для образцов сэндвич-панелей серии «Алюотерм» / Е. А. Петрова, О. А. Калмыков, Е. И. Лугченко // Науковий вісник будівництва. – 2015. – Вип. 81. – С. 40–48.

7 The elastic response of sandwich structures to local loading / V. Koissin [et al.] // Composite structures. – 2004. – Vol. 63, is. 3–4. – P. 375–385.

8 Димитриенко, Ю. И. Численное моделирование деформирования и прочности трехслойных композитных конструкций с дефектами / Ю. И. Димитриенко, Ю. В. Юрин, Н. Н. Федонюк // Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – № 3 (11). – С. 3–23.

9 Левчук, А. А. Статический расчет металлических трехслойных панелей с утеплителем из минераловатных плит и пенопласта / А. А. Левчук // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 4. – С. 151–156.

10 Осадчий, Н. В. Аналитический и конечно-элементный расчет прямоугольных трехслойных панелей на поперечный изгиб / Н. В. Осадчий, В. Т. Шепель // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 10 (93). – С. 53–59.

11 Mead, D. J. The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions / D. J. Mead, S. Markus // Journal of Sound and Vibration. – 1969. – Vol. 10, Is. 2. – P. 163–175.

12 Paimushin, V. N. Theory of moderately large deflections of sandwich shells having a transversely soft core and reinforced along their contour / V. N. Paimushin // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol. 53, No. 1. – P. 1–16.

13 Kuzniatsova, M. Definition of rational form of lateral perforated baffle for road tanks / M. Kuzniatsova, A. Shimanovsky // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 72–79.

14 Шимановский, А. О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики / А. О. Шимановский, А. В. Путьято. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 61 с.

15 Зеленая, А. С. Напряженно-деформированное состояние упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым заполнителем / А. С. Зеленая // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – Вып. 10. – С. 67–74.

A. O. SHIMANOVSKY, I. E. KRAKAVA

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

INFLUENCE OF THE SANDWICH PANELS' COUNTOUR FIXING CONDITIONS ON THEIR STRESS-STRAIN STATE

The stress-strain state of rectangular three-layered plates under the action of a uniformly distributed pressure is analyzed with the help of finite element modeling in the ANSYS software package environment. The problem is solved in an elastic formulation, taking into account geometric nonlinearity. The article considers the influence of various options for hinged fixing of the sandwich panels contour with and without a rigid diaphragm on the structure deformation.

Keywords: sandwich panel, stress-strain state, contour fixing.

Получено 30.10.2020