

УДК 691-419:539.37

И. Е. КРАКОВА¹, О. И. ЯКУБОВИЧ¹, А. М. КАРАБАЕВ²

¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

²Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

В программном продукте ANSYS Mechanical выполнен расчет напряженно-деформированного состояния слоистой конструкции, находящейся под действием равномерно распределенной силы, приложенной к верхнему слою, с учетом температуры и массы элементов конструкции. Также определено влияние температуры слоев исследуемой конструкции на величину прогибов ее элементов.

Ключевые слова: слоистая плита, напряженно-деформированное состояние, термоупругий изгиб.

Многослойные конструкции получили широкое применение в машиностроении, строительстве, на транспорте. Целесообразность их использования чаще всего обусловлена тем, что они при небольшой массе обладают достаточно высокой прочностью и жесткостью. Например, используя стеновые и кровельные сэндвич-панели, удастся быстро и при относительно невысоких затратах построить торговые, складские и промышленные здания.

Такая ситуация потребовала развития исследований в области многослойных конструкций. Использование положений теории упругости и пластичности дало возможность создания математических моделей стержней, пластин и оболочек, находящихся под действием различных нагрузок. При усложнении моделей (увеличении числа слоев) возрастает число решаемых дифференциальных уравнений. Учет различных геометрических и физических нелинейностей требует введения упрощающих гипотез или использования численных методов [1, 2].

В работе [3] получено аналитическое решение задачи изгиба пластины, закрепленной шарнирно по всему периметру либо защемленной по двум смежным сторонам, под действием собственного веса и равномерно распределенной нагрузки. В статье [4] для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) прямоугольных анизотропных пластин, находящихся под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки, применен метод коллокаций и взвешенных невязок. Выполнено сравнение характеристик в задачах изгиба прямоугольных и анизотропных слоистых пластин, рассчитанных в рамках пространственной теории упругости, классической теории пластин Кирхгофа – Лява, теориям Тимошенко и ломаной линии Григолюка – Кулико-

ва. В работе [5] с помощью метода конечных элементов выполнены расчеты сдвигающей силы в среднем слое сэндвич-панели для случаев, при которых облицовочные металлические панели имеют одинаковый и разный профиль.

Термоупругопластическое деформирование круговой трехслойной пластины с легким наполнителем, жестко заделанной по контуру, на упругом основании рассмотрено в статье [6]. При расчетах пренебрегали температурой, ушедшей на нагрев металлического слоя. Температура обшивок принималась равной температуре среднего слоя в местах склейки слоев.

В работе [7] решена задача о нагреве композитной трехслойной сэндвич-панели, к верхнему слою которой прикладывалась комплексная нагрузка в виде распределенного давления и теплового воздействия, являющегося следствием контакта верхнего слоя панели с поверхностью. Получены распределения температуры в сэндвич-панели для различных моментов времени.

Расчеты НДС круглой трехслойной пластинки, находящейся в неоднородном температурном поле, выполнены в статье [8]. Тепловой поток подводился к верхнему слою пластины. Авторы принимали, что контур пластинки термоизолирован, и температуры в слоях пластинки известны.

Представленная статья является развитием работы [9]. Ее целью является анализ НДС прямоугольной в плане сэндвич-панели с учетом реального распределения температуры по толщине. В качестве средства решения задачи использован программный комплекс конечноэлементного моделирования ANSYS Mechanical.

Рассматриваемая сэндвич-панель представляет собой трехслойную конструкцию бескаркасного типа, включающую два металлических листа (обшивки), между которыми расположен средний слой (сердечник), выполненный из поропластов или минеральной ваты. Ее длина 4,5 м, ширина 0,5 м, высота 0,08 м. Облицовочные слои выполнены из оцинкованной стали толщиной 0,005 м. Средний слой изготовлен из минеральной ваты. С учетом необходимости учета изменения температуры по толщине панели все ее составные части моделировались трехмерными телами.

Физико-механические характеристики материалов приняты следующими:

– облицовочные слои: плотность 7800 кг/м^3 , модуль упругости $E = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона 0,3, температурный коэффициент линейного расширения $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, коэффициент теплопроводности $58 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;

– минеральная вата: плотность 110 кг/м^3 , модуль упругости $E = 5,6 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона 0,12, температурный коэффициент линейного расширения $8,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, коэффициент теплопроводности $0,035 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [10].

Для конечно-элементного моделирования была создана структурированная сетка из 50 тысяч элементов SOLID186 (рисунок 1). Принято, что панель опирается нижними ребрами на неподвижное основание, поэтому для них запрещалось перемещение по оси y . Для обеспечения неподвижности пластины как твердого тела дополнительно были наложены связи по осям x и z на два крайних узла одного из нижних ребер длиной 0,5 м.

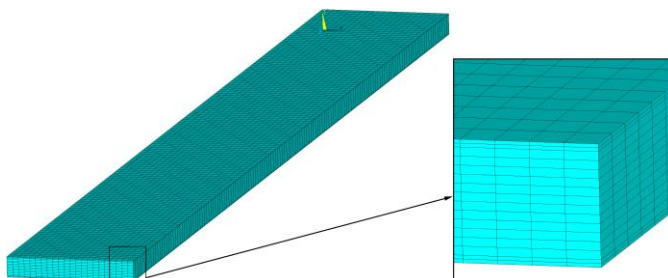


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель сэндвич-панели

При расчетах полагалось, что температуры верхней и нижней обшивок имеют значения t_1 и t_2 соответственно. Также к верхнему облицовочному слою прикладывалась ветровая нагрузка, давление от которой рассчитывалось по формуле [11]

$$p = 0,5\rho v^2,$$

где ρ – плотность воздуха; v – скорость ветра.

Для рассмотренных далее в работе случаев расчетное значение давления принято равным 240 Па.

Конечноэлементное решение рассматриваемой задачи может быть выполнено несколькими способами. Наиболее общий подход связан с введением в рассмотрение для каждого узла дополнительной степени свободы, соответствующей изменению температуры. Однако такой подход во многих случаях требует значительных затрат времени на численное решение дифференциальных уравнений теории термоупругости [12, 13].

С другой стороны, тепловая задача может решаться отдельно от статического анализа. В этом случае на первой стадии расчета устанавливается распределение температур по объему конструкции. Затем, используя найденные значения температур, определяется НДС. При выполнении данной работы использован именно такой подход.

На первом этапе исследований выполнялся расчет распределения температуры в слоях сэндвич-панели при быстром нагреве внешней облицовки, которое может быть вызвано, например, действием солнечного излучения. Оказалось, что в этом случае наблюдался нагрев только тонкого слоя минеральной ваты, соприкасающегося с нагретой облицовкой, что соответствует реальной ситуации. Аналогичная ситуация наблюдается и при достаточно быстром охлаждении облицовки. Такой результат объясняется тем, что минеральная вата обладает низким коэффициентом теплопроводности.

На втором этапе выполнялся расчет прогибов и НДС сэндвич-панели с учетом реального распределения температур по ее толщине. Наибольший интерес вызвали напряжения, возникающие в среднем слое, выполненном из минеральной ваты. На рисунке 2 представлены некоторые результаты расчета.

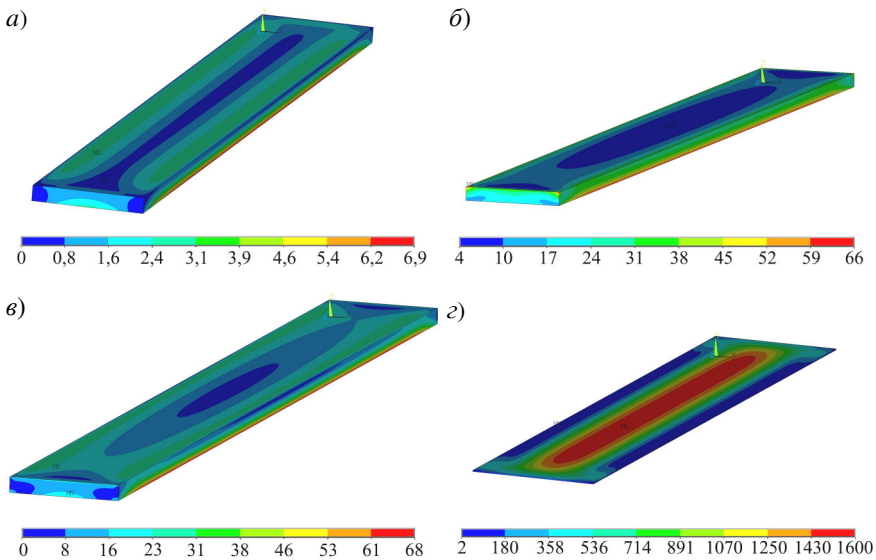


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений (кПа) в сэндвич-панели:
a – средний слой – без нагрева; *б* – средний слой – при $t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$;
в – средний слой – при $t_1 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; *г* – верхняя облицовка – при $t_1 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунки 2, *a*, *б*, *в* демонстрируют характер распределения напряжений в срединном слое сэндвич-панели. Максимальные значения эквивалентных по Мизесу напряжений наблюдаются в зоне контакта минеральной ваты с нижним облицовочным слоем, который ребрами опирается на плоскую поверхность. Сравнение численных значений напряжений, получаемых при различном нагреве внешней обшивки, показал, что изменение температуры верхнего слоя при постоянной температуре нижнего не приводит к значительному изменению напряжений по сравнению со случаем постоянной температуры по всему объему. Значения напряжений не превышают допустимые и составляют 38–45 кПа.

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния нижнего и верхнего облицовочных слоев сэндвич-панели. На рисунке 2, *г* представлено распределение напряжений в верхнем облицовочном слое, к которому прикладывалась внешняя распределенная нагрузка. Также принимались во внимание силы тяжести элементов панели. Разница в значениях эквивалентных по Мизесу напряжений в облицовочных слоях составила менее 10 %. Максимальные напряжения оказались близкими к 1,6 МПа.

На рисунке 3 представлены графики относительных деформаций для точек поперечных осей слоев сэндвич-панели при различных температурах

верхнего облицовочного слоя. Анализ полученных результатов показывает, что при заданной распределенной нагрузке в случае одинаковой температуры всех слоев относительные деформации верхнего облицовочного слоя незначительны. При его нагреве деформации существенно увеличиваются. При повышении температуры верхнего облицовочного слоя от 25 до 50 °С его деформации увеличиваются в 2 раза (рисунок 3, а). Названное увеличение температуры также приводит к росту деформаций в среднем и нижнем облицовочном слоях (рисунок 4 б, в), причем при 50 °С максимальные деформации срединного слоя минеральной ваты, которые наблюдаются на его краях, оказываются в 4 раза большими по сравнению со случаем одинаковой температуры всех слоев. При этом увеличение температуры сверх 25 °С ведет к изменению формы зависимости относительной деформации по ширине пластины.

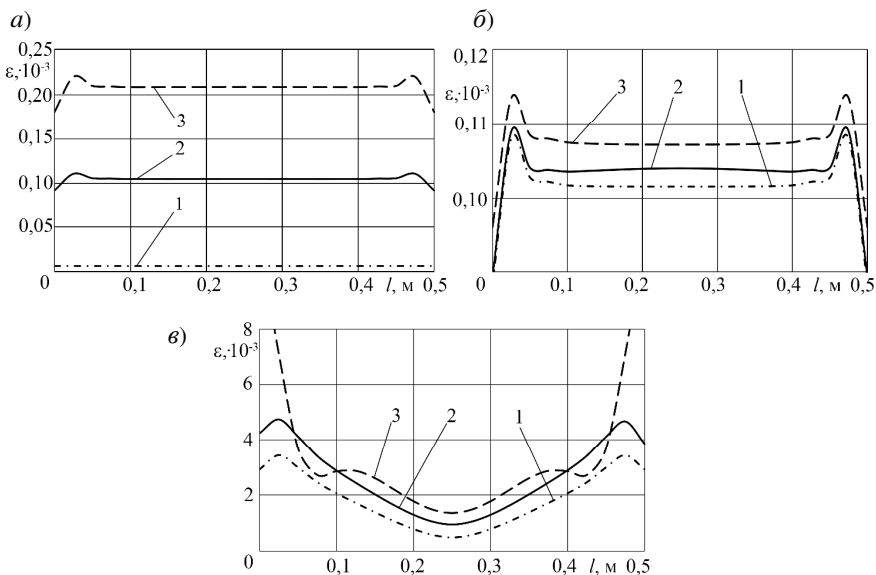


Рисунок 3 – Относительные деформации точек поперечных осей верхнего (а) и нижнего (б) облицовочного и среднего (в) слоев сэндвич-панели при:
 1 – $t_1 = 0^\circ C$; 2 – $t_1 = 25^\circ C$; 3 – $t_1 = 50^\circ C$

Рисунок 4 иллюстрирует изменение прогибов продольных осей слоев сэндвич-панели при понижении температуры верхнего облицовочного слоя. Из графиков видно, что прогибы имеют похожий характер, причем во всех слоях при изменении разницы температур на 15 °С отличаются в среднем в 1,4 раза. Максимальный прогиб наблюдается в нижнем слое панели, что обусловлено действием сил тяжести, и при температурах $t_1 = 0^\circ C$ и $t_2 = 25^\circ C$ составляет около 0,9 мм.

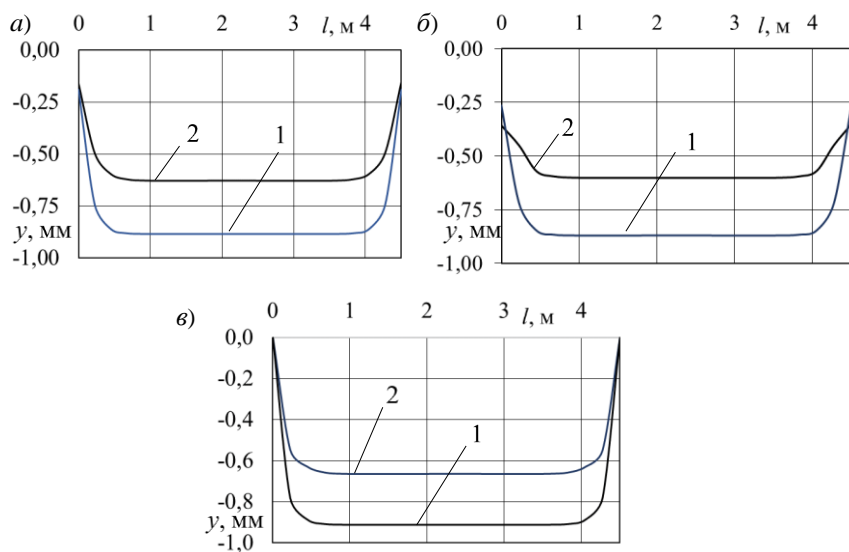


Рисунок 4 – Прогибы продольных осей срединных плоскостей минеральной ваты (а), верхней (б) и нижней (в) облицовочной панели:
 1 – при $t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t_1 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Полученные в работе результаты демонстрируют, что при расчетах напряжений и деформаций слоистых конструкций, эксплуатируемых при переменных температурах, следует принимать во внимание температурные деформации. Наибольшие значения относительных деформаций наблюдаются в среднем слое панели, а максимальные напряжения и прогибы – в нижнем облицовочном слое. Увеличение температуры наружного покрытия на 50° и более приводит к значительному росту деформаций заполнителя, что может стать причиной его расслоения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Осадчий, Н. В.** Построение моделей статической и динамической прочности многослойных конструкций на основе вариационного исчисления / Н. В. Осадчий, В. А. Малышев, В. Т. Шелель // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 56. – С. 58–71.

2 **Vinson, J. R.** Plate and panel structures of isotropic, composite and piezoelectric materials, including sandwich construction / J. R. Vinson. – Dordrecht : Springer, 2005. – 423 p.

3 Техническая теория изгиба упругих прямоугольных пластин, шарнирно опертых по периметру или защемленных по двум смежным сторонам / А. С. Кравчук [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 2. – С. 73–82.

4 **Голушко, С. К.** Разработка и применение метода коллокаций и наименьших невязок к решению задач механики анизотропных слоистых пластин / С. К. Голушко, С. В. Идимешев, В. П. Шапеев // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 9, № 5. – С. 24–36.

5 **Guo, Y.** Design method of bending load-carrying capacity for sandwich panels with different metal panel on both sides / Y. Guo, X. Yao, K. Liu // 22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. – Rolla : Missouri University of Science and Technology, 2014. – P. 511–523.

6 **Яровая, А. В.** Термоупругопластическое деформирование круговой трехслойной пластины на упругом основании / А. В. Яровая // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2017. – № 1. – С. 16–27.

7 **Курочка, К. С.** Расчет термоупругих деформаций в сэндвич-панели / К. С. Курочка, Е. В. Комракова // Информационные технологии и системы 2018 (ИТС 2018) : материалы междунар. науч. конф. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 178–179.

8 **Старовойтов, Э. И.** Термоупругое деформирование трехслойной круглой пластины поверхностными нагрузками различных форм / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 1 (42). – С. 81–87.

9 **Кракова, И. Е.** Конечно-элементное моделирование строительных конструкций с учетом температурных деформаций / И. Е. Кракова, О. И. Якубович, А. М. Карабаев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 2. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 29–30.

10 Теплопроводность строительных материалов, их плотность и теплоемкость [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmateriale/teploprovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost>. – Дата доступа : 10.09.2021.

11 **Куприянов, В. Н.** Строительная климатология и физика среды / В. Н. Куприянов. – Казань : КГАСУ, 2007. – 114 с.

12 **Green, A. E.** Thermoelasticity without energy dissipation / A. E. Green, P. M. Naghdi // Journal of Elasticity. – 1993. – Vol. 31, no. 3. – P. 189–208.

13 **Карнаухов, В. Г.** Связанные задачи теории вязкоупругих пластин и оболочек / В. Г. Карнаухов, И. Ф. Киричок. – Киев : Наукова думка, 1986. – 220 с.

I. E. KRAKAVA¹, V. I. YAKUBOVICH¹, A. M. KARABAEV²

¹*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

²*Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan*

STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS FOR LAYERED STRUCTURES CONSIDERING TEMPERATURE DEFORMATIONS

In the software product ANSYS Mechanical, the stress-strain state simulation is performed for a layered structure under the influence of a uniformly distributed force applied to the upper layer, taking into account the temperature and the mass of the structural elements. The influence of the temperature of the layers of the investigated structure on the elements deflections value is also determined.

Keywords: layered plate, stress-strain state, thermoelastic bending.

Получено 30.11.2021