

УДК 539.41

И. Е. КРАКОВА

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАКЕТА СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ

С помощью программного комплекса ANSYS выполнено конечно-элементное моделирование деформирования наиболее нагруженной нижней сэндвич-панели, транспортируемой в составе пакета. Учитывается действие нагрузок, возникающих при вертикальных колебаниях автотранспортного средства. Рассмотрено влияние инерционных нагрузок на напряженно-деформированное состояние панели для случаев укладки пакетов в один и два яруса.

Ключевые слова: сэндвич-панель, транспортный пакет, напряжения, вертикальные перемещения.

В современном строительстве при возведении зданий разнообразного назначения широко используются сэндвич-панели. Они представляют собой трехслойную конструкцию, которая включает две обшивки из тонких металлических листов и располагающийся между ними наполнитель, обладающий малой жесткостью. Разработка конструкций таких панелей предполагает анализ прочности под действием эксплуатационных нагрузок. В то же время важно, чтобы при транспортировке их потребительские свойства также сохранялись.

Доставка сэндвич-панелей к местам строительства чаще осуществляется с использованием автомобильного транспорта. К перевозке они предоставляются упакованными заводом-изготовителем в транспортные пакеты из нескольких уложенных друг на друга панелей. Такой пакет имеет большие габаритные размеры при небольшой массе. При транспортировке они испытывают динамические нагрузки и силы от средств крепления к кузову автомобиля. При этом нередки ситуации, при которых вследствие деформаций средств крепления, упаковочного материала и груза в процессе транспортировки происходит разрушение транспортных пакетов и повреждение груза.

Существует большое количество публикаций, связанных с исследованием слоистых конструкций, находящихся под действием статических и динамических нагрузок.

В работах [1–4] рассматривается изгиб несимметричных трехслойных пластин различной геометрической формы со сжимаемым наполнителем. Все расчеты выполняются аналитически с применением различных методов теории упругости. В частности, авторы этих работ поведение обшивки моделируют с помощью теории Киргхофа, а поведение наполнителя – с помощью гипотез, учитывающих поперечные деформации пластины. В статье [5] рассмотрена симметричная сэндвич-панель, на лицевой слой которой действует

статическое равномерное давление. Авторы изучали влияние условий закрепления панели на ее напряженно-деформированное состояние. В [6] получено решение трехмерной задачи изгиба ламинированной пластины под действием равномерной и синусоидальной распределенной нагрузки для симметричного и несимметричного расположения слоев. Статьи [6, 7] посвящены исследованию влияния периодических и локальных ударных нагрузок на напряженно-деформированное состояние. Также известны работы, в которых авторы исследуют влияние дефектов слоистых панелей [8–10] на их напряженно-деформированное состояние.

В публикациях [11–14] представлены расчеты напряженно-деформированного состояния однопролетных и многопролетных панелей под действием статических нагрузок с учетом сдвиговых деформаций среднего слоя. В качестве материалов срединного слоя рассматриваются минеральная вата [11, 13], пенопласт [11], пенополистирол [13] и базальтовая вата [14]. Полученные результаты демонстрируют приемлемое соответствие данным натурных испытаний.

В то же время публикации, в которых исследуется крепление грузов при транспортировке [15, 16], как правило, не рассматривают возможность деформирования груза под действием силы тяжести и сил в элементах крепления.

В работах [17, 18] были проанализированы некоторые эффекты, которые проявляются при транспортировке груза, имеющего малую жесткость. Настоящая работа является продолжением этого исследования.

В качестве объекта исследования принят транспортный пакет, включающий семь кровельных трехслойных панелей с минераловатным утеплителем ПП 1200.100.0,5-С.П с размерами 4130×1200×100 мм, между которыми размещены пенопластовые подложки размером 100×40×4 см (рисунок 1).

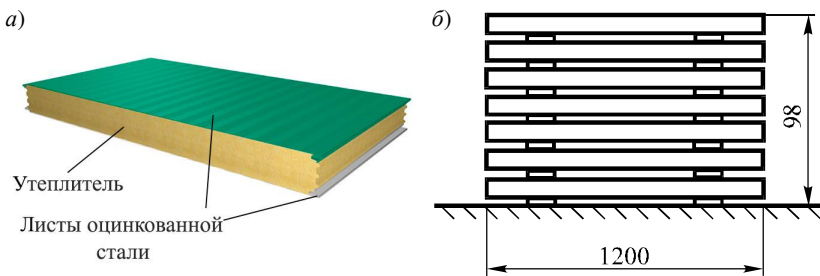


Рисунок 1 – Схемы одной сэндвич панели (а) и транспортного пакета (б)

В работе выполнен расчет для одного пакета, штабеля из двух пакетов, размещенных на платформе автотранспортного средства, крепление которых к полу транспортного средства обеспечивалось тремя прижимными ремнями, натяжение каждого принималось равным 3000 Н. В таблице 1 представлены значения параметров, принятые для расчетов.

Таблица 1 – Исходные данные для расчетов

Параметр	Один пакет	Штабель из двух пакетов
Суммарная масса панелей и пенопластовых прокладок, кг	674	1458
Динамическое давление, Па	627	3018,5
Статическое давление, Па	1345	2910
Равномерное вертикальное давление, Па	6356,5	9486

Для определения динамических нагрузок и сил, действующих на нижнюю наиболее нагруженную панель, ранее были разработаны расчетные схемы пакета и получены формулы, позволяющие рассчитать статические и динамические нагрузки, а также действие силы инерции при вертикальных колебаниях транспортного средства [19].

При разработке геометрической модели в программном комплексе ANSYS принято, что элементы рассматриваемого пакета панелей обладают следующими физико-механическими характеристиками:

– стальная обшивка – модуль Юнга $E_1 = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,3$, плотность $\rho_1 = 7800$ кг/м³;

– утеплитель (минеральная вата) – $E_2 = 3$ МПа; $\nu_2 = 0,12$; $\rho_2 = 110$ кг/м³;

– пенопластовые подложки – $E_3 = 10$ МПа; $\nu_3 = 0,2$; $\rho_3 = 15$ кг/м³.

Тонкие металлические обшивки моделировались оболочечным элементом SHELL181, внутренний слой (минеральная вата) и пенопластовые подложки – трехмерных элементом SOLID185. Для задания сил инерции использовался элемент SURF154. Конечноэлементная сетка была создана в автоматическом режиме. При задании граничных условий учтено отсутствие перемещений нижних поверхностей подложек, связанных с основанием. На рисунке 3 представлена конечноэлементная модель для одного из рассмотренных вариантов.

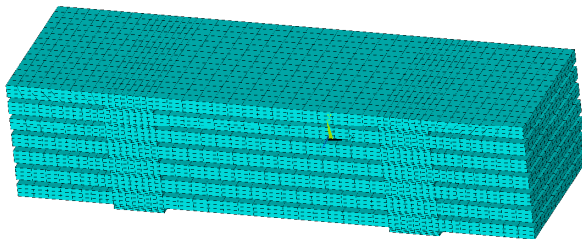


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель пакета из 7 одинаковых сэндвич-панелей

В результате расчетов определялись напряжения и перемещения точек наиболее нагруженной нижней панели. На рисунке 4 представлены схемы распределения напряжений в нижней панели от действия шести и тринадцати панелей, что соответствует одно- и двухъярусному расположению пакетов.

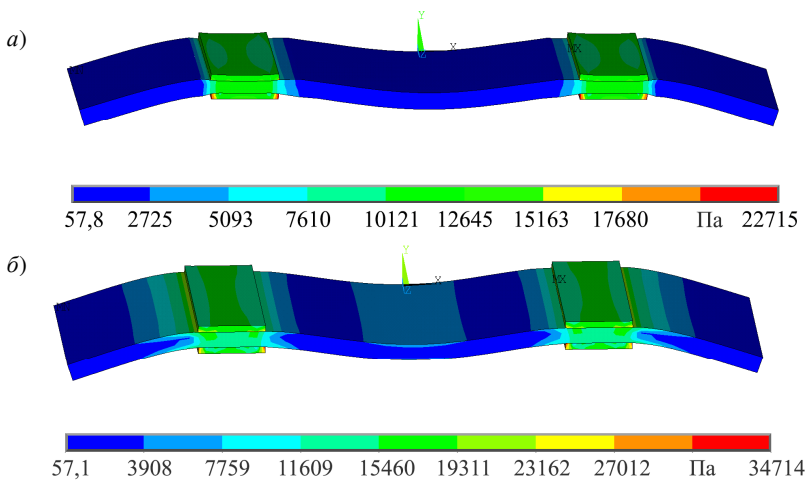


Рисунок 4 – Эквивалентные по Мизесу напряжения в нижней панели:
a – одноярусное; *б* – двухъярусное расположение пакетов

Результаты расчетов показывают, что максимальные напряжения возникают в зонах контакта пенопластовых подложек и облицовочных листов. Максимальные значения в срединном слое сэндвич-плиты при различном количестве панелей сверху находятся в пределах 23–88 кПа.

Результаты расчетов растягивающих напряжений σ_x от приложенных нагрузок представлены на рисунке 5.

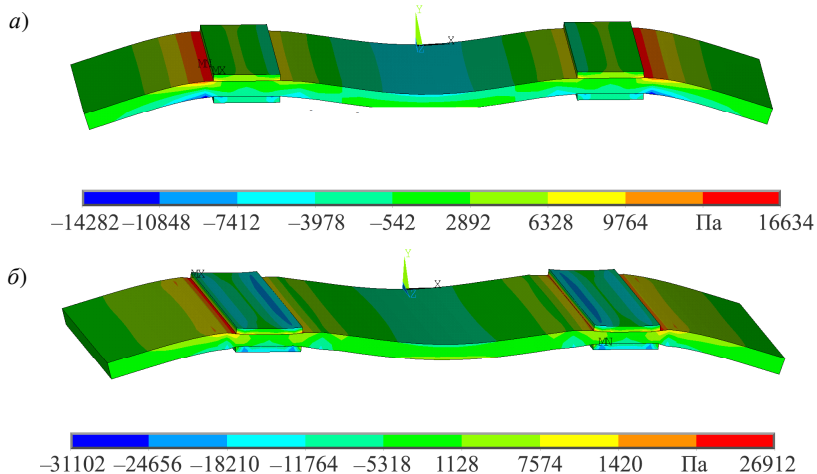


Рисунок 5 – Растягивающие напряжения σ_x :
a – одноярусное; *б* – двухъярусное расположение пакетов

Максимальные растягивающие напряжения возникают в верхнем металлическом облицовочном слое в зоне его контакта с пенопластовой прокладкой, через которую передается вся нагрузка со стороны панелей, расположенных выше. При двухъярусном расположении пакетов их значения достигают 26,9 кПа, что в 1,6 раза больше, чем при транспортировке одного пакета. Сжимающие напряжения достигают максимального значения в нижнем облицовочном слое и при двухъярусном расположении пакетов достигают 31,1 кПа. Максимальные значения растягивающих напряжений в минеральной вате не превышают предела ее прочности 100 кПа [20].

Также в ходе расчетов определялись вертикальные перемещения точек нижней панели, которая испытывает максимальную нагрузку (рисунок 6).

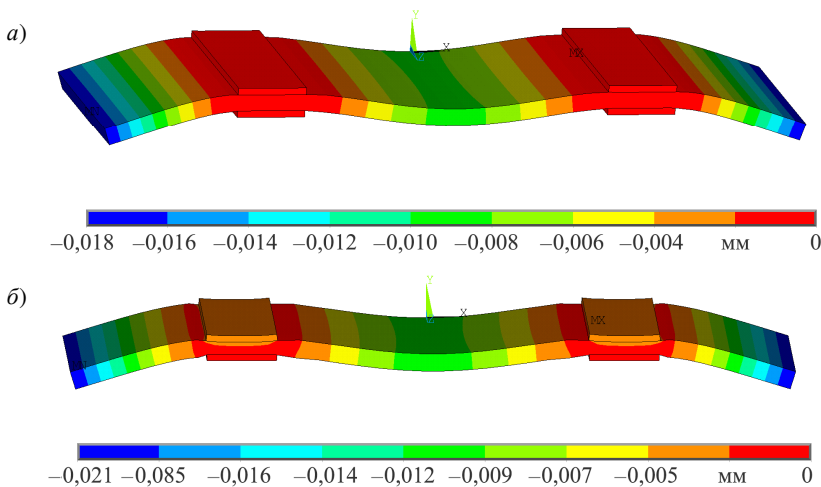


Рисунок 6 – Вертикальные перемещения точек нижней панели:
a – одноярусное; *б* – двухъярусное расположение пакетов

Как видно из рисунка 6, *б*, при перевозке одного пакета части панели, расположенные вблизи пенопластовых прокладок, практически не перемещаются. Средняя часть панели смещается на величину, близкую к 0,008 мм. Наибольшие перемещения имеют место у точек, расположенных на концах панели и составляют около 0,018 мм. При двухъярусном расположении пакетов под действием давления верхней пенопластовой прокладки, перемещения под ней становятся заметными и достигают 0,003 мм. С учетом невысокой прочности минеральной ваты и малой толщины облицовочной панели под действием ударных нагрузок, связанных с движением автомобиля по неровному покрытию, может произойти смятие срединного слоя сэндвич-панели. При этом центральная часть панели прогибается на 0,009 мм, а ее концы смещаются на 0,021 мм.

Таким образом, результаты расчетов, выполненных для случая использования в качестве креплений шести прижимных ремней, показывают, что при вертикальных колебаниях транспортных пакетов в случаях одно- и двухъярусного размещения напряжения, возникающие в наиболее нагруженной нижней панели, не превышают предела прочности облицовочного листа и минеральной ваты.

Если после крепления груза либо в процессе его транспортировки натяжения ремней будут различными, например при повороте, то картина распределения напряжений станет несимметричной. Это может привести к смещению панелей в пакете относительно друг друга и, в конечном счете, стать причиной повреждения груза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Захарчук, Ю. В.** Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // *Механика. Исследования и инновации.* – 2017. – № 10. – С. 55–66.
- 2 **Козел, А. Г.** Деформирование физически нелинейной трехслойной пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // *Механика. Исследования и инновации.* – 2019. – Вып. 12. – С. 105–112.
- 3 **Леоненко, Д. В.** Упругопластический изгиб прямоугольной трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Д. В. Леоненко, А. С. Зеленая // *Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб.* – Вып. 33. – 2018. – С. 65–71.
- 4 **Осадчий, Н. В.** Аналитическое исследование поперечного изгиба трехслойной панели с жестким наполнителем / Н. В. Осадчий, В. Т. Шепель // *Механика и машиностроение.* – 2014. – № 5 (93). – С. 37–43.
- 5 **Шимановский, А. О.** Влияние условий закрепления контура сэндвич-панелей на их напряженно-деформированное состояние / А. О. Шимановский, И. Е. Кракова // *Механика. Исследования и инновации.* – 2020. – Вып. 13. – С. 183–188.
- 6 **Zenkour, A. M.** Three-dimensional elasticity solution for uniformly loaded cross-ply laminates and sandwich plates / A. M. Zenkour // *Journal of Sandwich Structures and Materials.* – 2007. – Vol. 9, is. 3. – P. 213–238.
- 7 **Mahesh, R.** Numerical study on the response of sandwich composite plates with foam core and different skin thicknesses to various impact energy levels / R. Mahesh, P. N. Rajesh // *International Journal of Mechanical Engineering.* – 2021. – Vol. 6, is. 1. – P. 17–23.
- 8 **Баранчик, А. В.** Моделирование деформирования и прочности трехслойных сэндвич-панелей с дефектами / А. В. Баранчик, В. Г. Баранчик // *Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. статей II Междунар. науч.-техн. конф.* – Брест : БрГТУ, 2018. – С. 3–7.
- 9 Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии / Д. С. Лобанов [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* – 2015. – № 4. – С. 159–170.
- 10 **Медведский, А. Л.** Численный анализ поведения слоистой композитной панели с межслоевыми дефектами под действием динамических нагрузок / А. Л. Медвед-

ский, М. И. Мартыросов, А. В. Хомченко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 127–130.

11 **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.

12 **Драган, В. И.** Прочность и деформативность трехслойных металлических панелей с утеплителем / В. И. Драган, А. А. Левчук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 53–58.

13 **Петров, С. М.** Несущая способность и деформативность трёхслойных панелей с обшивками из металлических и композиционных материалов и легкими заполнителями : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / С. М. Петров. – М. : Моск. гос. строит. ун-т, 2013. – 22 с.

14 Исследование напряженно-деформированного состояния кровельных панелей с утеплителем из базальтовой ваты / И. С. Холопов [и др.] // Металлические конструкции. – 2006. – Т. 12, № 4. – С. 255–262.

15 International Guidelines on Safe Load Securing for Road Transport. – Geneva : IRU Secretariat, 2014. – 76 p.

16 **Ramos, A. J. G.** Analysis of cargo stability in container transportation : Doctor of Philosophy Thesis / A. J. G. Ramos. – Porto : Universidade do Porto, 2015. – 164 p.

17 Cargo fastening on automobile transport considering its deformation / A. O. Shimanovsky [et al.] // Transport Means : Proceedings of the 22nd International Conference. – 2018. – Vol. 1. – P. 192–196.

18 **Шимановский, А. О.** Моделирование колебаний и напряженно-деформированного состояния пакетов сэндвич-панелей при их транспортировке / А. О. Шимановский, И. Е. Кракова // Строительная механика и конструкции. – 2022. – № 4. – С. 49–57.

19 Правила безопасного размещения и крепления грузов в кузове автомобильного транспортного средства : утв. М-вом трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь 10.10.2005. – Минск : Энергопресс, 2015. – 55 с.

20 ГОСТ 32603–2021. Панели металлические трехслойные с утеплителем из минеральной ваты. Технические условия. – Введ. 01.04.2022. – 49 с.

I. E. KRAKAVA

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

STRESS-STRAIN STATE OF A SANDWICH PANELS PACKAGE AT ITS TRANSPORTATION

Using the ANSYS software package, there is performed the finite element modeling of the deformation of the most loaded bottom sandwich panel transported as a part of a package. The action of loads from the vehicle vertical oscillations is taken into account. The influence of inertial loads on the panel stress-strain state for the cases of stacking packages in one and two tiers is considered.

Keywords: sandwich panel, transport package, stresses, vertical displacements.

Получено 10.11.2022