

УДК 534.13:656.135

И. Е. КРАКОВА, О. И. ЯКУБОВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПАКЕТОВ ИЗ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

Рассматриваются свободные колебания сэндвич-панелей при транспортировке в кузове автотранспортного средства. Описаны особенности конечноэлементного моделирования транспортного пакета, состоящего из нескольких рядов трехслойных панелей, соединенных друг с другом. Выполнен анализ частот и форм собственных колебаний сэндвич-панелей при различном их количестве в штабеле.

Ключевые слова: свободные колебания, сэндвич-панель, конечноэлементная модель, собственная частота.

Сэндвич-панели в настоящее время получили широкое применение в строительстве малоэтажных домов, производственных зданий и торговых павильонов. Они представляют собой трехслойную конструкцию, включающую в себя две обшивки из металлических профилированных листов, между которыми располагается средний слой из минераловатных плит, обладающих малой жесткостью [1]. При разработке конструкций таких панелей основное внимание уделяется анализу их прочности под действием эксплуатационных нагрузок. В то же время важно, чтобы при доставке таких панелей потребителю они сохраняли свои свойства.

К перевозке сэндвич-панели предоставляются упакованными заводом-изготовителем в транспортные пакеты из нескольких уложенных друг на друга панелей. При этом с учетом незначительной массы панелей полученный транспортный пакет имеет большие габаритные размеры при небольшой массе. Изготовители для максимального использования грузоподъемности транспортных средств осуществляют погрузку таких пакетов в два яруса. Это приводит к тому, что центр тяжести полученного грузового места находится высоко над уровнем пола автотранспортного средства, что может привести к потере устойчивости груза, а также его смещению в продольном и поперечном направлениях [3]. Такие смещения могут быть обусловлены резонансами, связанными с совпадением частот колебаний автомобиля с собственными частотами колебаний груза. При этом нередки ситуации, при которых вследствие деформаций средств крепления, упаковочного материала и груза в процессе транспортировки происходит разрушение транспортных пакетов и повреждение груза [4].

В настоящее время исследованию многослойных конструкций посвящено немало работ. В работах [5–7] исследуется напряженно-деформируемое со-

стояние трехслойных и многослойных пластин, в работе [8] – трехслойного упругого стержня. В работе [9] предложен алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния при изгибе неразрезных сэндвич-панелей с учетом сдвига ортотропного среднего слоя и податливости опор. При этом панель моделируется как составная конструкция, состоящая из двух брусьев, соединенных по всей длине податливыми связями сдвига и абсолютно жесткими поперечными связями. В работе [10] автор рассматривает неупругий изгиб сэндвич-панели, анализирует зависимости податливости в поперечном направлении таких конструкций от параметров армирования несущих слоев.

Несмотря на большое количество исследований в области расчета трехслойных конструкций остаются вопросы, связанные с исследованием поведения таких конструкций в случае укладки их друг на друга в штабель при транспортировке автотранспортом. В данной работе выполнен анализ частот собственных колебаний сэндвич-панелей при укладке нескольких панелей в штабель.

Расчеты частот собственных колебаний сэндвич-панели были выполнены с использованием программного комплекса ANSYS [11]. Для этого была создана упрощенная конечно-элементная модель кровельной трехслойной панели с минераловатным утеплителем ПП 1200.100.0,5-С.П. Панель представляет собой трехслойную конструкцию, включающую в себя две обшивки из металлических профилированных листов и приклеиваемый к ним средний слой из минераловатных плит (рисунок 1). Для листов используется прокат тонколистовой холоднокатаный и холоднокатанный горячеоцинкованный с полимерным покрытием, толщиной 0,5 и 0,55 мм. В качестве утеплителя применяются минераловатные плиты плотностью 110–125 кг/м³.

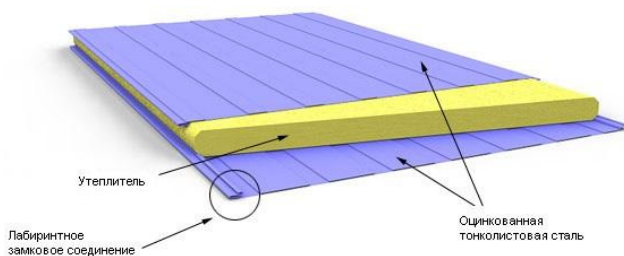


Рисунок 1 – Структура сэндвич-панели

Модель включала несколько аналогичных панелей, размещенных друг над другом в штабеле, между которыми располагались пенопластовые подложки размером 100×40×4 см. Аналогичные подложки размещались между нижней панелью и неподвижным основанием.

В разработанной геометрической модели, состоящей из трех материалов: сталь, минеральная вата, пенопласт (подложки под панели), приняты сле-

дующие параметры: для первого материала (сталь) модуль Юнга принят равным $E_1 = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,3$, плотность $\rho_2 = 7800$ кг/м³, для минеральной ваты модуль Юнга $E_2 = 3$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,12$, плотность $\rho_2 = 110$ кг/м³, а для пенопласта принимались модуль Юнга $E_3 = 10$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_3 = 0,2$, плотность $\rho_3 = 15$ кг/м³. Рассматривались случаи с разным количеством панелей в штабелях. Металлический слой моделировался элементом SHELL181, внутренний слой (минеральная вата) и пенопластовые подставки – элементом SOLID185. Для задания инерционных нагрузок использовался элемент SURF154. Конечноэлементная сетка была создана в автоматическом режиме. Общее число конечных элементов модели одной сэндвич-панели с подложками составило около 3000. При задании граничных условий было запрещено перемещение нижних поверхностей подставок, связанных с основанием. На рисунке 2 приведена конечноэлементная модель для одного из рассмотренных вариантов.

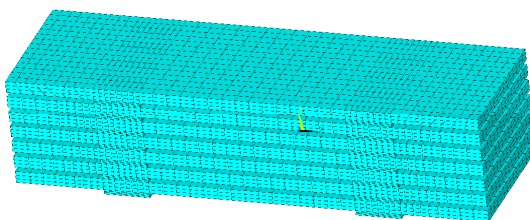


Рисунок 2 – Модель семи сэндвич-панелей, уложенных в штабель

Модальный анализ созданных моделей при разном количестве панелей, уложенных в штабель, позволил получить значения собственных частот и выявить формы колебаний сэндвич-панелей. В таблице 1 представлены значения частот собственных колебаний при различном числе панелей в штабеле для нескольких форм колебаний. Они показывают, что при увеличении числа панелей в штабеле низшая частота колебаний постепенно уменьшается. Также можно заметить, что рост количества панелей ведет к сближению частот собственных колебаний системы, что, в свою очередь, значительно расширяет зоны резонанса на амплитудно-частотной характеристике и может стать причиной разрушения транспортного места.

Таблица 1 – Значения собственных частот колебаний сэндвич панелей, при различном их числе в штабеле

Форма колебаний	Число панелей в штабеле						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4,68	4,58	4,52	4,44	4,26	4,09	3,92
3	5,89	4,61	4,57	4,55	4,45	4,41	4,40
6	8,29	6,22	4,61	4,58	4,55	4,49	4,50
9	18,74	8,18	6,24	5,76	4,60	4,56	4,56

Анализ форм собственных колебаний (рисунок 3) показывает:

- при первой, второй собственных частотах колебаний одной сэндвич-панели колеблются только ее консоли, а только при третьей форме наблюдается существенная амплитуда колебаний в ее средней части;
- при колебаниях двух панелей учет колебаниям консолей соответствуют уже первые четыре собственные частоты, частотам с пятой по седьмую соответствуют колебания ее средней, а при восьмой частоте наблюдается смещение всей панели;
- при колебаниях трех панелей колебаниям консолей соответствуют также частоты с первой по пятую, а при пятой форме наблюдаются колебания всей панели.
- при большем числе панелей в штабеле также первым частотам соответствуют колебания консолей, а далее появляются формы, при которых наблюдаются значительные смещения почти всех точек системы.

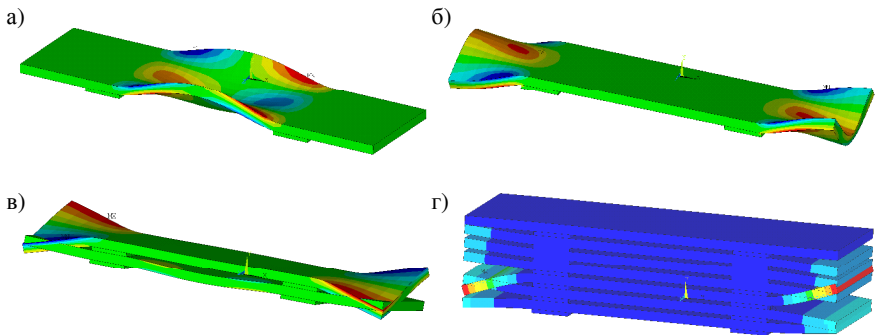


Рисунок 3 – Формы собственных колебаний сэндвич-панелей при частотах собственных колебаний:

a – 17,3 Гц; *б* – 18,4 Гц; *в* – 8,2 Гц; *г* – 4,5 Гц

Поскольку в диапазоне скоростей движения грузового автомобиля 60–85 км/ч на ровных и на неровных дорогах колебания полуприцепа происходят при частотах 5–7 Гц [12], то оказывается, что частоты вынуждающих сил соответствуют частотам собственных колебаний транспортируемого груза. Это может привести к относительному поперечному сдвигу панелей в штабеле, а в дальнейшем стать причиной смещения груза относительно пола полуприцепа и привести к опрокидыванию груза в кузове транспортного средства.

Для обеспечения целостности груза при перевозке в штабелях целесообразно использовать не только обычные крепления ремнями, но и размещать груз в специальных жестких оболочках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Сэндвич-панели [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mzmk.by/продукция/сэндвич-панели>. – Дата доступа : 10.09.2018.
- 2 International Guidelines on Safe Load Securing for Road Transport. – 2014. – 76 p.
- 3 Шмелев, А. «Обманчивая» стретч-пленка / А. Шмелев // Компас экспедитора и перевозчика, 2017. – № 6. – С. 28–32.
- 4 Singh, P. Load Securement and Packaging Methods to Reduce Risk of Damage and Personal Injury for Cargo Freight in Truck, Container and Intermodal Shipments / P. Sing [et al.] // Journal of Applied Packaging Research. – 2014. – Vol. 6, No. 1. – P. 47–61.
- 5 Зеленая, А. С. Напряженно-деформированное состояние упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – Вып. 10. – С. 67–74.
- 6 Плескачевский, Ю. М. Динамика металлополимерных систем / Ю. М. Плескачевский, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – Минск : Беларуская навука, 2004. – 386 с.
- 7 Škec, L. Analysis of a geometrically exact multi-layer beam with a rigid interlayer connection / L. Škec, G. Jelenić // Acta Mechanica. – 2014. – Vol. 225, No. 2. – P. 523–541.
- 8 Журавков, М. А. Повторное деформирование упругопластического трехслойного стержня локальной нагрузкой / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 3(36). – С. 71–79.
- 9 Петров, С. М. Алгоритм расчета многопролетных «сэндвич»-панелей с учетом сдвига среднего слоя и упругой податливости опор / С. М. Петров // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 10. – С. 112–121.
- 10 Янковский, А. П. Моделирование упругопластического изгиба сэндвич-панелей с тонкими армированными несущими слоями / А. П. Янковский // Механика деформируемого твердого тела. – 2018. – № 1. – С. 72–80.
- 11 Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 639 с.
- 12 Дискомфорт, обусловленный вибрациями [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://til.scania.com/groups/bwd/documents/bwm/mdaw/mju2/~edisp/bwm_0000508_13.pdf. – Дата доступа : 09.09.2018.

I. E. KRAKOVA, V. I. YAKUBOVICH

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

FREE OSCILLATIONS OF TRANSPORT PACKAGES CONSISTING OF SANDWICH PANELS

Free vibrations of sandwich panels are considered for the case of their transportation in the car body. There are described the finite element modeling features for a transport package consisting of several layers of interconnected three-layer structural elements. The calculation and analysis of the sandwich-panels natural oscillations with their different number in the stack is performed.

Получено 03.11.2018