

трехмерном и двумерном пространстве для определения несущей способности слабых шламовых грунтов. Модельные исследования в системе Micromine позволяют прогнозировать возможность складирования галитовых отходов на слабое шламовое основание.

Список литературы

1 Создание блочной геомеханической модели района Северомуйского тоннеля в ГГИС Micromine Origin&Beyond / Г. С. Федотов [и др.] // Горный журнал. – 2023. – № 1. – С. 64–68.

2 Курцев, Б. В. Геомеханическое сопровождение горных работ с использованием ГГИС Micromine / Б. В. Курцев, Г. С. Федотов // Горный журнал. – 2022. – № 1. – С. 45–50.

УДК 534.13:656.135

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ И КОЛЕБАНИЯ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

И. Е. КРАКОВА, О. И. ЦЫГАНОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Трехслойные сэндвич-панели относятся к высокоэффективным конструкциям. Они широко используются в строительстве при возведении малоэтажных домов, зданий, павильонов производственного и торгового назначений, поскольку обеспечивают меньшую нагрузку на фундамент, хорошие тепло-, звукоизоляционные показатели, позволяют сократить сроки строительства. Строительная трехслойная сэндвич-панель представляет собой конструкцию, состоящую из двух лицевых несущих слоев, которые выполнены из тонкого листа стали, обладающего высокой прочностью, а между ними расположен средний слой – наполнитель. Слои соединены с помощью клея, что обеспечивает их совместную работу.

Доставка сэндвич-панелей к местам строительства чаще всего осуществляется автотранспортными средствами. От правильности размещения и крепления грузов в кузове автомобиля зависит целостность груза в процессе транспортировки и безопасность перевозки. Правила крепления грузов на автомобильном транспорте разработаны с учетом того, что перевозимый груз жесткий. Строительные сэндвич-панели обладают высокой деформативностью. Пакеты, сформированные из таких панелей, имеют относительно небольшую массу, но значительные габаритные размеры. С целью снижения затрат на перевозку такие пакеты в кузове автотранспортного средства часто размещают в два яруса. При этом центр тяжести груза находится на значительной высоте над полом автоплатформы, что приводит в процессе транспортировки груза к значительным по величине моментам сил инерции, приводящим к перераспределению вертикальных нагрузок на средства крепления.

Исследованию колебаний трехслойных пластин посвящено немало работ. Например, в статьях [1, 2] решена задача об определении собственной частоты колебаний трехслойной пластины при различных способах закрепления ее вершин и краев. Практически не рассматривались ситуации, связанные с размещением пакетов, сформированных из двух и более трехслойных панелей, в два яруса. Ранее нами была разработана методика расчета для пакета сэндвич-панелей, срединный слой которых выполнен из минеральной ваты [3]. Целью рассматриваемой работы стал анализ влияния механических свойств трех типов материала срединного слоя (заполнителя) строительных сэндвич-панелей на частоты собственных колебаний пакета и прочность панелей под действием нагрузок, возникающих при их перемещении автотранспортным средством.

Для анализа влияния механических свойств срединного слоя строительной сэндвич-панели были разработаны упрощенные модели пакетов, включающих в себя шесть панелей размером 7200×1000×80 мм, размещенных друг над другом. Между панелями установлены пенопластовые прокладки с размерами 400×1000×40 мм, расположенные симметрично относительно центра панели. Нижняя панель пакета опирается на такие же прокладки, установленные на неподвижное основание. Рассмотрен случай расположения одинаковых пакетов в два яруса.

Для расчета напряженно-деформированного состояния и расчета частот собственных колебаний для панелей с различным материалом срединного слоя в программном комплексе ANSYS построена конечно-элементная модель перевозимого груза, учитывающая особенности геометрии и физико-механических свойств материалов слоев, составляющих панели. Для расчета принимались следующие исходные данные: для стали (облицовочные слои) плотность $\rho_1 = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E_1 = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,3$. Рассмотрены три варианта исполнения наполнителя,

широко используемого при производстве сэндвич-панелей: минеральная вата – плотность $\rho_2 = 75 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E_2 = 5,6 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_2 = 0,12$, пенополиуретан – плотность $\rho_3 = 45 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E_3 = 12 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_3 = 0,26$; пенополистирол – плотность $\rho_4 = 20 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E_4 = 15 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_4 = 0,2$. Принято, что пенопластовые подложки обладают характеристиками: плотность $\rho_5 = 15 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E_5 = 10 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_5 = 0,2$. Поскольку на нижнюю панель в ярусе приходится наибольшая нагрузка от расположенных сверху панелей, то расчеты выполнялись для этой панели. Учет движения груза с транспортным средством выполнен с помощью силы инерции, которая приложена к одиннадцати панелям, расположенным выше нижней. Такое ее действие приводит к неравномерности вертикального давления на нижнюю панель. Это давление передается нижней панели через две пенопластовые прокладки. Для каждого вида панелей с учетом возникающей при торможении силы инерции определены интенсивности распределенной нагрузки. Для пакетов, сформированных из панелей со средним слоем из минеральной ваты, давление составило 14265 Н/м^2 ; для пакетов панелей из пенополистирола – 5418 Н/м^2 ; для пакетов панелей из пенополиуретана – 9490 Н/м^2 .

Результаты расчета напряженно деформированного состояния показали, что наибольший прогиб и напряжения возникают в зоне контакта подложки и нижней панели в пакете, средний слой которого выполнен из минеральной ваты, поскольку данный материал обладает большей способностью к деформации. Максимальные значения прогиба и напряжения в панели с наполнителем из пенополистирола оказались практически в два раза меньше, чем у аналогичной панели со средним слоем из пенополиуретана.

Анализ частот собственных колебаний сэндвич-панелей представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Значения частот собственных колебаний сэндвич-панелей при различных материалах среднего слоя

Форма колебаний	Собственные частоты колебаний сэндвич-панели со средним слоем, Гц		
	Минеральная вата	Пенополистирол	Пенополиуретан
1	13,670	19,991	17,369
2	14,930	20,177	17,466
3	27,857	38,505	33,581

Приведенные результаты показывают, что значения частот собственных колебаний по первой форме для панелей с более жестким наполнителем превышают частоты собственных колебаний панели с наполнителем из минеральной ваты на 30–50 %. Собственные частоты колебаний панелей с более легким средним слоем из пенополистирола и пенополиуретана отличаются незначительно несмотря на то, что плотности этих материалов различаются более, чем в два раза.

При транспортировке пакетов на полуприцепе автотранспортного средства, движущегося со скоростью 60–85 км/ч по ровным и неровным дорогам, колебания полуприцепа происходят при частотах 5–7 Гц. При размещении в пакете нескольких панелей частоты колебаний системы оказываются приблизительно в три раза меньшими [4]. Следовательно, использование наполнителя, отличного от минеральной ваты, не приводит к увеличению частот собственных колебаний до значений, при которых возможно уйти от резонанса. Значительные амплитуды колебаний могут привести к расслаблению средств крепления, смещению панелей в штабеле и стать причиной смещения груза относительно пола полуприцепа, либо его опрокидыванию.

Таким образом, результаты исследования показывают, что использование в качестве наполнителя сэндвич-панелей более жестких материалов не приводит к существенным изменениям напряжений и частот собственных колебаний. Поэтому при организации транспортировки таких панелей не рекомендуется создавать транспортные пакеты с числом панелей, большим, чем семь.

Список литературы

- 1 **Mallikarjuna, К. Т.** Free vibration of symmetrically laminated plates using a higher-order theory with finite element technique / К. Т. Mallikarjuna // Int. J. Numer. Meth. Eng., 1989. – Vol. 28, no. 8. – P. 1875–1889.
- 2 **Лопатин, А. В.** Определение основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины с двумя свободными краями / А. В. Лопатин, П. О. Деев // Вестник СибГАУ. – 2011. – Вып. 1 (34). – С. 46–50.
- 3 **Кракова, И. Е.** Свободные колебания транспортных пакетов из сэндвич-панелей / И. Е. Кракова, О. И. Якубович // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 150–154.
- 4 **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.