

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ ПОЛИМЕРОСОТОПЛАСТА И ОБШИВКАМИ ИЗ КЛЕЕВОГО ПРЕПРЕГА

Д. В. ДЕДОВА, М. И. МАРТИРОСОВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Трехслойные сотовые панели представляют собой высокоэффективные композиционные конструкции, состоящие из трех основных компонентов.

1 Внешние обшивки – выполняют роль силовых элементов, воспринимающих продольные и поперечные нагрузки. Изготавливаются из высокопрочных материалов, в том числе из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

2 Сотовый наполнитель – легкий материал, имеющий ячеистую структуру, обеспечивает жесткость конструкции при минимальном весе.

3 Клеевое соединение – обеспечивает монолитность конструкции и передачу нагрузок между слоями.

Такое сочетание и взаимодействие составных элементов обеспечивает высокую жесткость (в 2–3 раза выше, чем у традиционных материалов), высокую прочность (в 1,5–2 раза выше, чем у монолитных конструкций) и наименьшую массу готовой конструкции (в 3–5 раза легче монолитных конструкций). Благодаря такому набору характеристик сотовые панели нашли широкое применение в различных областях производства. Например, в авиационно-космической технике из них изготавливают обшивку крыла и оперения, элементы механизации, элементы интерьеров пассажирских самолетов, обтекатели и защитные панели, в судостроении – конструкции корпусов катеров, в автомобилестроении – элементы салона и кузова.

Для исследования прочности и надежности таких конструкций необходимо проводить соответствующие расчеты. В современной инженерии для такого вида расчетов широко используется метод конечных элементов (МКЭ). Среди основных преимуществ использования МКЭ можно выделить:

- возможность анализа сложной геометрии конструкции;
- учет нелинейности (физической и геометрической);
- экономию времени и ресурсов расчета;
- универсальность применения для разных типов задач.

Наряду с преимуществами МКЭ можно выделить некоторые ограничения данного подхода в решении задач прочности:

- зависимость от качества конечно-элементной сетки;
- необходимость валидации конечно-элементной модели (КЭМ).

В данной работе проводится расчетное и экспериментальное исследование деформирования и разрушения трехслойной сотовой панели при действии сжимающей нагрузки. Форма панели – квадрат со стороной a . Высота панели – h .

В качестве материала обшивок сотовой панели рассматривается клеевой препрег КМКС-2м.120.Т60 (стеклоткань Т60/2(ВМП)-78 и клеевая композиция). Схема укладки смешанная и имеет следующий вид: $[-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$. В качестве материала сотового наполнителя используется полимеросотопласт ПСП-1-2,0-48 (на основе полимерной бумаги типа «Номекс», пропитанной фенолформальдегидной смолой).

В качестве нагрузки рассматривается сжатие панели прессом, движущимся со скоростью $v = 0,25$ мм/мин.

Численное исследование проводилось в программном комплексе LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp). Каждый монослой моделировался отдельным набором конечных элементов (КЭ) типа «Solid». Сотовый наполнитель моделировался КЭ типа «Shell». Соединение сотового наполнителя со слоями обшивки осуществлялось при помощи клеевого контакта «TIED_SHELL_EDGE_TO_SURFACE_OFFSET». Для данного типа контакта характерно «связывание» узлов только в том случае, если поверхности контакта находятся близко друг к другу. Склеивание несущих слоев между собой

осуществлялось с помощью контакта «AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK». Данный тип контакта позволяет учитывать разрушение клеевого соединения между слоями.

Все используемые при численном моделировании физико-механические характеристики материалов соответствуют режиму испытаний RTD (Room Temperature Dry) – испытания, проведенные при комнатной температуре +23 °С и влажности в состоянии поставки (состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, содержание влаги в них не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %). Данные характеристики получены от производителей материалов (клеявого препрега и заполнителя).

В результате исследования определялась критическая сила разрушения, а также общий вид разрушения сотовой панели. Из численного исследования получено, что критическая сила разрушения панели составляет 6,3 кН.

Экспериментальное исследование проводилось в соответствии с ГОСТ Р 56816-2015 [1] на сервогидравлической испытательной машине INSTRON 5985. Скорость нагружения образцов равна скорости движения пресса при численном исследовании. Общее количество испытанных образцов – 12 шт. По результатам натурных испытаний получена средняя критическая сила разрушения панелей, которая равна 6,79 кН.

Из результатов расчетно-экспериментального исследования следует, что расхождение критической силы разрушения панели составляет ~7 %. Данное расхождение обусловлено идеализацией граничных условий в расчетном исследовании, а также разбросом реальных свойств материалов.

В работе проведено сравнение характера разрушения панелей. По результатам исследований получена одинаковая картина разрушения: локальная потеря устойчивости сотового заполнителя, разрушение клеевого соединения между верхней обшивкой и сотовым заполнителем.

Проведенное расчетно-экспериментальное исследование подтвердило эффективность использования МКЭ для анализа трехслойных панелей с сотовым заполнителем, а также адекватность предложенного в работах [2–6] метода моделирования трехслойных панелей.

Список литературы

- 1 ГОСТ Р 56816-2015. Композиты полимерные. Определение механических характеристик при сжатии материала внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций перпендикулярно к плоскости образца. – М. : Стандартформ, 2016. – 14 с.
- 2 Исследование напряженно-деформированного состояния трехслойной панели с сотовым заполнителем при наличии внутренних дефектов / А. Л. Медведский, М. И. Мартиросов, А. В. Хомченко, Д. В. Дедова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 2. – С. 675–684.
- 3 Поведение трёхслойных панелей с сотовым заполнителем из полимеросотопластов повышенной плотности с внутренними дефектами при действии реактивной струи двигателя / Л. Н. Рабинский, М. И. Мартиросов, Д. В. Дедова, А. В. Хомченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – Вып. 3. – С. 298–303.
- 4 Influence of Internal Defects on the Stress-Strain State of a Three-Layer Panel with Different Honeycomb Fillers / D. V. Dedova, E. L. Kuznetsova, M. I. Martirosov, A. V. Khomchenko // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, № 11. – P. 1457–1460.
- 5 Dynamics of Composite Cylindrical Panels with Honeycomb Filler after Internal Damage by Aircraft Engine Jet / L. N. Rabinsky, M. I. Martirosov, A. V. Khomchenko, D.V. Dedova // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, № 5. – P. 726–729.
- 6 Impact on Three-Layer Cylindrical Panel with Fiberglass Filler / L. N. Rabinsky, M. I. Martirosov, D. V. Dedova [et al.] // Russian Engineering Research. – 2025. – Vol. 45, № 1. – P. 119–122.

УДК 539.3

ТЕОРИЯ СТЕРЖНЕЙ И ПЛАСТИН ДЛЯ ГРАДИЕНТНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД: КОРРЕКТНЫЕ ВАРИАЦИОННЫЕ ПОСТАНОВКИ

М. С. ЕГОРОВА, О. В. ТУШАВИНА

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

В настоящей работе решается актуальная задача построения корректных математических моделей деформирования тонкостенных конструкций для неклассических пористых сред с учётом масштабных эффектов. Предложена обобщённая вариационная модель градиентной пористой среды, синтезирующая подходы Миндлина и Тупина. Основное отличие разработанной модели заключает-