

Список литературы

1 Синтез *in situ* матриц жаропрочных композиционных материалов и жаростойких защитных покрытий / А. Н. Астапов [и др.] // *Авиация и космонавтика* : тез. докладов 20-й Междунар. конф., Москва, 22–26 ноября 2021 г. – М. : Перо, 2021. – С. 475–476.

2 Матуляк, А. И. Получение покрытий на основе MoSi_2 методом реакционного синтеза *in situ* на УККМ // *Гагаринские чтения – 2022* : сб. тезисов работ XLVIII Междунар. молодежной науч. конф. Москва, 12–15 апреля 2022 г. – М. : Перо, 2022. – С. 535–536.

3 Астапов, А. Н. Получение покрытий на основе MoSi_2 методом реакционного синтеза / А. Н. Астапов, А. И. Матуляк // *Электromеталлургия*. – 2022. – № 8. – С. 20–32. – DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-8-20-32.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ СТЕКЛОСОТОПЛАСТА ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ ПОД ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

А. Л. МЕДВЕДСКИЙ

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,
г. Жуковский, Российская федерация*

М. И. МАРТИРОСОВ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская федерация

Д. В. ДЕДОВА

ПАО «Корпорация "Иркут"», г. Москва, Российская федерация

Трехслойные панели с сотовым наполнителем широко применяются в различных отраслях современной промышленности, например, в гражданском авиастроении из них изготавливают носовые и хвостовые панели килей и стабилизатора, элероны, рули высоты и направления, форкиль, обтекатель крыла – фюзеляж, носовой обтекатель фюзеляжа (кок), панели мотогондолы, эксплуатационные люки, панели пола и интерьера салона, створку основной опоры шасси (крыльцевую), створки передней опоры шасси и т. д. Такое практическое распространение сотовых панелей связано с рядом преимуществ: большой удельной прочностью, высокой жесткостью и устойчивостью при продольном сжатии, высокими характеристиками усталостной прочности, повышенными тепло- и звукоизоляционными свойствами, высокой технологичностью.

Сотовые панели представляют собой пространственную конструкцию, состоящую из двух тонких прочных облицовочных пластин (обшивок) и толстой легкой сердцевины – наполнителя, разделяющего обшивку и обеспечивающего их устойчивость.

В работе рассматривается плоская трехслойная панель прямоугольной формы заданных геометрических размеров с сотовым наполнителем. Обшивки панели состоят из двух монослоев, выполненных из клеевого препрега КМКС-2м.120.Т10 (стеклоткань Т-10-80 и клеевая композиция). Укладка монослоев смешанная и имеет следующий вид: $[+45^\circ/90^\circ]$.

Как известно, стекло- и углепластики на основе клеевых препрегов по сравнению с аналогичными традиционными композитами имеют повышенную трещиностойкость, прочность при межслоевом сдвиге, усталостную и длительную прочность. Все необходимые физико-механические характеристики клеевого препрега – паспортные от производителя материала.

Сотовый наполнитель выполнен из стеклосотопласта ССП-1-2,5 (гексагональная форма сотовой ячейки со стороной 2,5 мм) отечественного производства. Стеклосотопласт марок ССП-1 изготавливается из электроизоляционной ткани ЭЗ-100П (ЭЗ/1-100П, Э1/1-100, Э1/1-100П), бакелитового лака ЛБС-1 и клея БФ-2. Форма сот обеспечивает достаточно высокие показатели прочности и устойчивости конструкции в целом и имеют сравнительно простую технологию изготовления. Стенки сот расположены перпендикулярно несущим слоям, поэтому наполнитель не воспринимает нагрузку от обшивки и вследствие этого не выпучивается при возрастании нагрузки. Необходимые для расчета физико-механические характеристики наполнителя известны от производителя, высота сотового наполнителя задана. В таблице 1 приведены физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства стеклосотопластов марки ССП-1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства сотовластов марки ССП-1

Характеристики	Показатели
Плотность, кг/м ³	65–110
Предел прочности при сжатии (без обшивок), МПа	3,0–3,5
Предел прочности при растяжении, МПа	5,0–6,0
Предел прочности при сдвиге в направлении параллельном плоскости склейки элементов ячеек, МПа	1,8–2,5
Предел прочности при сдвиге перпендикулярном плоскости склейки элементов ячеек, МПа	1,3–2,0
Модуль упругости при сдвиге в направлении параллельном плоскости склейки элементов ячеек, МПа	93,0–130,0
Модуль упругости при сдвиге в направлении перпендикулярном плоскости склейки элементов ячеек, МПа	52,0–80,0
Температура эксплуатации, °С	От –60 до +160
Водопоглощение, %	2,0–2,2
Горючесть	Трудногоряемые
Химическая стойкость	Стойкие к действию спирта, ацетона, авиационного топлива и масел
Методы механической обработки	Любые, применяемые для обработки металлов

В результате причин различного характера, связанных с производством, технологией и эксплуатацией, в трехслойных панелях могут возникать дефекты (повреждения), которые оказывают влияние на прочность и несущую способность конструкции в целом.

В рассматриваемой задаче принимается, что в центре панели присутствуют дефекты эллиптической формы (геометрия осей задана). Это межслоевые дефекты типа расслоений. Расслоение – это нарушение адгезионной связи, вызванное механическими воздействиями ударного характера или внутренними напряжениями, например, после формования. Первый дефект расположен между монослоями верхней обшивки, второй – между верхней обшивкой и сотовым наполнителем. Дефекты расположены один под другим (центры эллипсов).

Рассматривается поведение изучаемой панели под действием нагрузки ударного характера при наличии и отсутствии дефектов (в сравнении).

Задача решалась численно. Использовался метод конечных элементов (МКЭ). Создание конечно-элементной модели (КЭМ) панели осуществлялось в программном комплексе Simcenter Femap. Каждый монослой обшивок трехслойной панели моделировался отдельным набором объемных конечных элементов (КЭ). Сотовый наполнитель моделировался отдельным набором оболочечных КЭ. Соединение сотового наполнителя со слоями обшивок осуществлялось при помощи клеявого контакта «TIED_SHELL_EDGE_TO_SOLID_OFFSET», склеивание слоев обшивок между собой – с помощью контакта «AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK». Взаимодействие зоны дефекта между обшивкой и сотовым наполнителем моделировалось с помощью контакта «AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE», зоны дефекта между слоями обшивки – «AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE».

В качестве нагрузки на панель рассматривалось ударное воздействие абсолютно жесткого бойка с полусферическим наконечником. Диаметр, материал (металл) и скорость бойка заданы. Удар направлен перпендикулярно плоскости панели в центр дефектов. Граничные условия – жесткое защемление коротких торцов панели.

В результате проведенного исследования определяется распределение полей напряжений и деформаций в слоях обшивок в различные моменты времени. На основе полей напряжений и деформаций анализируется распределение индексов разрушений по различным критериям разрушения для полимерных композиционных материалов. Расчет проведен по критериям разрушения Hoffman, DeAlia, Puppo-Evensen, Puck, Hashin, LaRC (Langley Research Center). Считается, что разрушение наступает при индексе разрушения, равном единице. Если индекс разрушения, меньше единицы, то разрушения не происходит, запас прочности в этом случае обеспечивается. Представлено изменение прогибов в панели с дефектами и без дефектов в зависимости от времени. Показано изменение кинетической энергии бойка в зависимости от времени в панели с дефектами и без таковых.

Аналогичные расчеты проведены и для трехслойной панели с сотовым наполнителем из стекло-сотовласта ССП-1-3,5 и ССП-1-4,2 (гексагональная форма сотовой ячейки со стороной 3,5 мм и 4,2 мм соответственно), а также для зарубежного аналога фирмы Hexcel Composites (США).