

однонаправленного углепластика на основе углеродного волокна T300 и эпоксидного связующего PRIME 20 LV. Схема укладки панели симметричная, сбалансированная и смешанная с типовыми углами ± 45 , 0 и 90° , всего в укладке 45 слоёв с толщиной монослоя $\delta = 0,1$ мм. Панель моделируется послойно с использованием объёмных конечных элементов первого порядка. Модель материала «221_MAT_ORTHOTROPIC_SIMPLIFIED_DAMAGE» основана на деформационном критерии разрушения. Соединение монослоёв осуществляется с помощью когезионных элементов – модель материала «138_MAT_COHESIVE_MIXED_MODE».

В качестве нагрузки рассматривается ударное воздействие множественными фрагментами пневматика, число которых варьируется от 1 до 7. Фрагменты имеют форму прямоугольных параллелепипедов, высота которых находится в пределах от 50 до 100 мм, длина – от 70 до 100 мм, ширина – от 30 до 50 мм, и воздействуют на панель по нормали к поверхности. Начальные скорости фрагментов направлены вдоль нормалей к внешней поверхности панели в точках соударения и изменяются в пределах от 15 до 35 м/с. В качестве модели материала фрагментов используется гиперупругая модель «77_MAT_OGDEN_RUBBER», параметры которой определяются экспериментально в соответствии с ГОСТ 270-75.

Для автоматизации процесса в программном комплексе Simcenter Femap (Siemens PLM Software) разработана программа (макрос), позволяющая создавать конечно-элементные модели (КЭМ) с различными параметрами фрагментов пневматика. Данный макрос позволяет создавать КЭМ фрагментов пневматика, размеры которых псевдослучайно изменяются в заданных пользователем пределах. Узлы на геометрической поверхности для построения нормалей, вдоль которых будут ориентированы фрагменты, определяются пользователем.

Разработана методика автоматического послойного моделирования панели из ПКМ в программном комплексе Simcenter3D (Siemens PLM Software) с помощью приложения Laminate Composite с дальнейшим импортом полученной КЭМ в программный комплекс LS-DYNA (ANSYS Inc.). В программном комплексе Simcenter Femap (Siemens PLM Software) разработан пакет программ (макросов) на языке VBA для сохранения ориентации монослоёв при импорте, позволяющий записывать ориентацию элементов в отдельный файл, который в дальнейшем используется для преобразования ориентации монослоёв в LS-DYNA, а также преобразовывать типы конечных элементов из Laminate Solid и Cohesive Solid в Solid.

Решение задачи проведено в LS-DYNA с помощью метода конечных элементов с использованием центрально-разностной схемы интегрирования по времени с автоматическим определением шага согласно критерию Куранта – Фридрихса – Леви. По результатам полученного решения проведён анализ повреждений монослоёв панели по коэффициентам деградации материала. Рассмотрено изменение кинетической энергии фрагментов пневматика, а также их полных перемещений.

УДК 621.793 + 621.762.55

ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{MoSi}_2\text{-HfB}_2$ НА УККМ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ $\text{MoSi}_2\text{-HfB}_2\text{-Si}$, $\text{MoSi}_2\text{-HfSi}_2\text{-SiB}_4$ И $\text{MoSi}_2\text{-HfB}_2\text{-HfSi}_2\text{-SiB}_4$

А. И. МАТУЛЯК, А. Н. АСТАПОВ, В. А. ПОГОДИН, А. Н. ТАРАСОВА
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Данная работа является продолжением исследований о возможности получения жаростойких защитных покрытий на основе системы $\text{MoSi}_2\text{-HfB}_2$ на углерод-керамических композиционных материалах (УККМ) класса C/C-SiC с помощью реакционного синтеза *in situ* [1, 2].

На данный момент проведен синтез покрытий из порошковых систем $\text{MoSi}_2\text{-HfB}_2\text{-Si}$, $\text{MoSi}_2\text{-HfSi}_2\text{-SiB}_4$ и $\text{MoSi}_2\text{-HfB}_2\text{-HfSi}_2\text{-SiB}_4$ при температуре 1620°C и остаточном давлении аргона ~ 100 Па. Структурно-фазовые исследования синтезированных слоев выполнены с помощью сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии и рентгеновского фазового анализа.

Микроструктура покрытия, синтезированного из порошковой композиции в системе $\text{MoSi}_2\text{-HfB}_2\text{-Si}$, представлена в виде высокопористого слоя, состоящего из частично спеченных зерен MoSi_2 с равномерно распределенными дисперсными частицами HfB_2 , Si и SiC (следы). Дисперсность частиц MoSi_2 составляет ~ 10 мкм, а средний размер частиц HfB_2 – 1–5 мкм, у агломератов

HfB₂ – 10–12 мкм. Образование вторичной фазы SiC происходит за счет реакционного взаимодействия кремния с углеродом, который появляется в системе в результате диффузии из подложки и в качестве остатка при пиролизе связующего.

При синтезе покрытий из реакционных систем MoSi₂–HfSi₂–SiB₄ и MoSi₂–HfB₂–HfSi₂–SiB₄ образуются пористые слои с аналогичным равномерно распределенным по объему фазовым составом: MoSi₂, HfB₂, Si и SiC (следы). В обоих слоях структура представлена фрагментарно спеченными зернами MoSi₂ с равномерно распределенными в них частицами HfB₂ в виде дисперсных полиэдрических образований, а также в виде тонких игл. Предполагаем, что синтез полиэдрических частиц HfB₂ размером от 5 до 10 мкм, а также их последующий рост и спекание происходят в условиях наличия значительного количества жидкой фазы, образующейся при нагреве. По мере снижения доли жидкой фазы в результате увеличения полноты конверсии реагентов морфология формирующихся частиц сменяется на тонкие иглы длиной <2 мкм. Стоит отметить, что в системе MoSi₂–HfSi₂–SiB₄ жидкофазное спекание протекало лучше, что подтверждается большей долей сплошных участков в структуре синтезированного слоя, чем для слоя, полученного из композиции MoSi₂–HfB₂–HfSi₂–SiB₄. Это вызвано тем, что в системе MoSi₂–HfSi₂–SiB₄ отсутствуют исходные частицы HfB₂, наличие которых снижало бы площадь поверхности контакта между реагентами в расплаве и препятствовало бы увеличению сплошности структуры в результате спекания.

Также в работе предложены механизмы реакционного взаимодействия в системах MoSi₂–HfSi₂–SiB₄ и MoSi₂–HfB₂–HfSi₂–SiB₄ и выявлены причины высокой пористости синтезированных слоев. Механизмы реакционного взаимодействия включают перитектоидное разложение SiB₄ на SiB₆ и Si, образование расплава L₁ в системе Si–B, инконгруэнтное плавление HfSi₂ с образованием расплава L₂ и фазы HfSi, смешение расплавов L₁ и L₂, конгруэнтное растворение SiB₆ и HfSi в расплаве с одновременным химическим взаимодействием между Hf и B, Si и C.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00352.

Список литературы

- 1 Матуляк, А. И. Получение покрытий на УККМ из порошковых композиций MoSi₂–HfB₂–Si, MoSi₂–HfSi₂–SiB₄ и MoSi₂–HfB₂–HfSi₂–SiB₄ / А. И. Матуляк // Гагаринские чтения : сб. тезисов 50-й Междунар. молодежной науч. конф. – М. : Перо, 2024. – С. 596–597.
- 2 Получение покрытия на C/C–SiC композите из порошковой композиции Mo–HfSi₂–SiB₄ методом реакционного синтеза in situ / А. Н. Астапов [и др.] // Электротехнология. – 2024. – № 2. – С. 2–12.

УДК 539.3

ИЗГИБ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СЭНДВИЧ-ПЛАСТИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

А. С. МЕЛЬНИКОВА, А. Г. КОЗЕЛ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Сэндвич-панель – строительный материал, имеющий трёхслойную структуру, состоящую из двух листов жёсткого материала и слоя заполнителя между ними. Трёхслойные сэндвич-панели находят широкое применение в различных секторах строительства: в промышленном строительстве, при возведении сельскохозяйственных объектов, в жилищном строительстве и коммерческой недвижимости. Спрос на трёхслойные конструкции в строительстве обусловлен несколькими факторами. В первую очередь это энергоэффективность и долговечность, что особенно важно в условиях холодного климата. Во-вторых, такие конструкции удобны в монтаже и неприхотливы в эксплуатации, что позволяет экономить значительные средства в процессе эксплуатации. При выборе материала заполнителя для сэндвич-панелей акцентируют внимание не только на прочностных характеристиках, но и на стоимости материала заполнителя. Здесь же рассмотрим прогибы несущих слоёв сэндвич-пластины при использовании в качестве заполнителя пенополиуретана, пенопласта и фторопласта.

В [1] исследован спектр частот трёхслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем. Деформирование трёхслойных стержней и пластин при температурном воздействии рассмотрено в работах [2–5]. В [6] выполнен анализ динамики и прочности пакетов сэндвич-панелей как