

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

трехслойных конструкций под действием нагрузок, приводящих к значительным деформациям при длительной транспортировке. Статьи [7–8] посвящены исследованию сэндвич пластин при изменении внешних слоёв и жёсткости основания. В [9–10] исследовано деформирование трёхслойных конструкций при действии различных нагрузок.

Рассматривается несимметричная по толщине упругая трёхслойная прямоугольная пластина, состоящая из двух несущих слоев и сжимаемого заполнителя. Несущие слои выполнены из материалов высокой прочности и жёсткости, так как этими слоями воспринимается основная часть механической нагрузки, приходящейся на пластину. Заполнитель служит для образования монолитной конструкции, гарантирует перераспределение усилий между несущими слоями, тем самым обеспечивает совместную работу слоёв пластины.

Для изотропных несущих слоев приняты гипотезы Кирхгофа. Материалы несущих слоев не сжимаемы в поперечном направлении. В жестком заполнителе перемещения по толщине изменяются линейно, также учитывается обжатие заполнителя. Постановка и аналитическое решение рассматриваемой задачи приведено в [9].

В качестве материала заполнителя рассмотрим:

- пенопласт – синтетический материал, состоящий из вспененного полистирола. Он обладает низкой теплопроводностью, лёгкостью, прочностью, водостойкостью и долговечностью;
- пенополиуретан – современный материал, который представляет собой жидкую смесь из полиола и изоцианата. Он обладает высокой теплоизоляционной способностью, водостойкостью, прочностью, эластичностью и долговечностью;
- фторопласт – полимерный материал с высоким содержанием фтора, который применяется в различных сферах промышленности. Он обладает стойкостью к химически агрессивным реагентам, низкими коэффициентами трения, негорючестью и устойчивостью к воздействию температурных перепадов.

Численное решение было получено с помощью MathCad. Рисунок 1 иллюстрируют изменение прогибов несущих слоёв при следующих материалах заполнителя: 1 – пенополиуретан, 2 – пенопласт, 3 – фторопласт. Несущие слои выполнены из Д16Т. Нагрузка равномерно распределена по всей поверхности пластины интенсивностью $q = -1$ МПа, размеры пластины $l_x = 1$ м, $l_y = 1$ м, $h_1 = 0,04$ м, $h_2 = 0,02$ м, $h_3 = 0,4$ м. При численной апробации решения использовали механические характеристики материалов, приведенные в [11, с. 24].

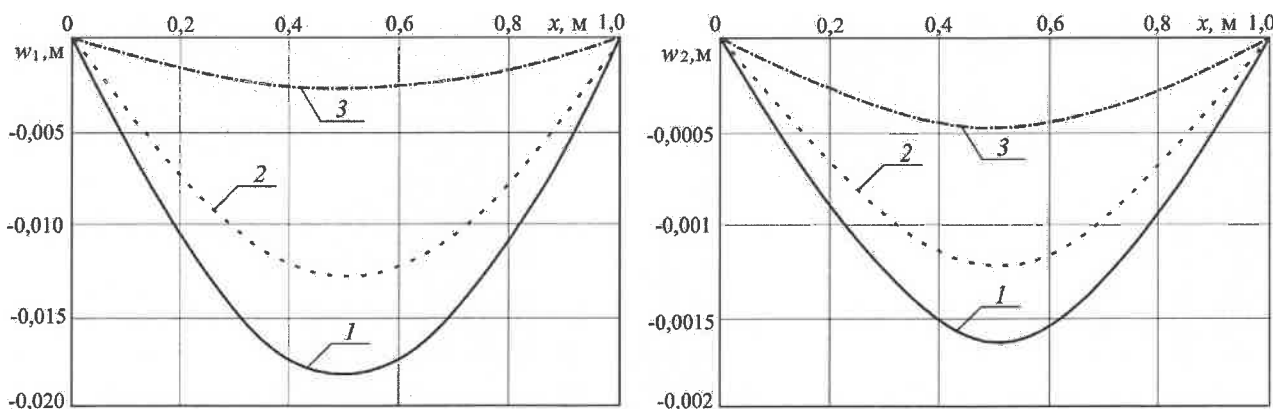


Рисунок 1 – Прогибы несущих слоев пластины при различных материалах заполнителя:
1 – пенополиуретан; 2 – пенопласт; 3 – фторопласт

Так как наибольшими упругими характеристиками обладает фторопласт, а наименьшими пенополиуретан, то была обнаружена следующая зависимость: чем меньше упругие механические характеристики материала заполнителя, тем больше прогибы несущих слоев. И наоборот, при применении материала заполнителя с большими механическими характеристиками наблюдается уменьшение прогибов несущих слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T24PM-004).

Список литературы

- 1 Леоненко, Д. В. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Д. В. Леоненко, Э. И. Старовойтов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – № 2. – С. 162–169.
- 2 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 31–35.
- 3 Леоненко, Д. В. Изгиб ступенчатой круговой сэндвич-пластины при тепловом нагружении / Д. В. Леоненко // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 123–127.
- 4 Козел, А. Г. Термоупругопластический изгиб трехслойной круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 100–108.
- 5 Зеленая, А. С. Цилиндрический изгиб упругопластической прямоугольной трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем в температурном поле / А. С. Зеленая // Проблемы физики, математики и техники. – 2019. – № 1 (38). – С. 45–49.
- 6 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 (35). – С. 49–57.
- 7 Козел, А. Г. Влияние сдвиговой жесткости основания на напряженное состояние сэндвич-пластины / А. Г. Козел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 6 (332). – С. 25–35.
- 8 Черняк, А. В. Изгиб сэндвич-пластины с внешними слоями, линейно изменяющимися по толщине / А. В. Черняк // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – № 15. – С. 235–240.
- 9 Зеленая, А. С. Деформирование упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2017. – № 6 (105). – С. 89–95.
- 10 Нестерович, А. В. Деформирование трехслойной круговой пластины при косинусоидальном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1 (42). – С. 85–90.
- 11 Старовойтов, Э. И. Трехслойные стержни в терморadiационных полях / Э. И. Старовойтов, М. А. Журавков, Д. В. Леоненко. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 275 с.

УДК 539.375

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В СТРИНГЕРНОЙ ПЛАСТИНЕ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ

М. В. МИР-САЛИМ-ЗАДЕ

Институт математики и механики, г. Баку, Азербайджан

Рассмотрена бесконечная изотропная упругая пластина, ослабленная круговым отверстием радиуса R . К пластине приклепаны поперечные упругие ребра жесткости. Контур кругового отверстия свободен от внешних усилий. На бесконечности пластина подвержена однородному растяжению вдоль стрингеров напряжением $\sigma_y^\infty = \sigma_0$. Действие приклепанных стрингеров в расчетной схеме заменяется неизвестными эквивалентными сосредоточенными силами, приложенными в местах расположения точек крепления.

По мере нагружения пластины силовой нагрузкой в ней будут возникать зоны предразрушения, которые моделируются как области ослабленных межчастичных связей материала. Принято, что (область) полоса предразрушения ориентирована в направлении максимальных растягивающих напряжений, возникающих в стрингерной пластине. Взаимодействие берегов зоны предразрушения моделируется связями между ними, имеющими заданную диаграмму деформирования. Физическая природа связей и размеры полосы предразрушения зависят от вида материала пластины. Считается, что закон деформирования связей задан. В общем случае он представляет собой нелинейный закон деформирования.

В исследуемом случае зарождение трещины представляет собой процесс перехода области предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала. Так как зона предразрушения мала по сравнению с остальной частью подкрепленной пластины, ее можно мысленно удалить, заменив разрезом поверхности (взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала). Рассмотрим полосу предразрушения длины l , исходящую из поверхности кругового отверстия и расположенную на отрезке оси абсцисс $y = 0$, $R \leq x \leq R + l$. Берега полосы предразрушения взаимодействуют, что сдерживает зарождение трещины. Считается, что между берегами имеются связи (силы сцепления). При действии внешних нагрузок на пластину в связях будут возникать усилия $p(x)$, имеющие из-за симметрии задачи относительно оси абсцисс только нормальную составляющую. Следовательно, к берегам полосы предразрушения будут приложены неизвестные нормальные напряжения, численно равные $p(x)$.