

- 5 Rani, R. Radially symmetric vibrations of exponentially tapered clamped circular sandwich plate using harmonic differential quadrature method / R. Rani, R. Lal // *Mathematical analysis and its applications*. – 2015. – No. 143. – P. 633–643.
- 6 Lal, R. On the use of differential quadrature method in the study of free axisymmetric vibrations of circular sandwich plates of linearly varying thickness / R. Lal, R. Rani // *Journal of vibration and control*. – 2016. – No. 7 (22). – P. 1729–1748.
- 7 Леоненко, Д. В. Колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании Пастернака / Д. В. Леоненко // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. – 2014. – № 1. – С. 59–63.
- 8 Зорич, В. А. Математический анализ. Ч. I / В. А. Зорич. – 6-е изд. доп. – М.: МЦНМО, 2012. – 710 с.
- 9 Bauchau, O. Kirchhoff plate theory / O. Bauchau, J. Craig // *Structural analysis*. – 2009. – No. 163. – P. 819–914.
- 10 Timoshenko, S. On the correction for shear the differential equation for transverse vibrations of the prismatic bars / S. Timoshenko // *Philosophical magazine and journal of science*. – 1921. – No. 41 (245). – P. 744–746.
- 11 Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
- 12 Маркова, М. В. Вынужденные колебания круговой трёхслойной пластины ступенчато-переменной толщины / М. В. Маркова // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки*. – 2022. – № 3 (132). – С. 121–127.
- 13 Тонг, К. Н. Теория механических колебаний / К. Н. Тонг. – М.: Машгиз, 1963. – 351 с.

УДК 621.793

## РЕАКЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОКИСЛЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА

*А. И. МАТУЛЯК, А. Н. АСТАПОВ, И. В. СУКМАНОВ, А. Н. ТАРАСОВА, В. С. ТЕРЕНТЬЕВА  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Исследование посвящено разработке тонкослойных покрытий [1–3], предназначенных для защиты от высокотемпературного окисления жаропрочных углерод-керамических композиционных материалов (УККМ), перспективных для применения в теплонапряженных конструкциях скоростных маневрирующих летательных аппаратов и возвращаемых космических аппаратов.

Приведены результаты исследований в области реакционного синтеза покрытий на основе  $\text{MoSi}_2$  на поверхности УККМ класса  $\text{C}_f/\text{C}-\text{SiC}$  из порошковых композиций в системах  $\text{Mo}-\text{Si}$  (состав 1) и  $\text{Mo}-\text{Si}-\text{HfB}_2$  (состав 2) при 1500 °С и давлении разрежения 8–9 МПа. Методами рентгеновского фазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) в структуре синтезированных слоев достоверно установлены фазы [1]:  $\text{MoSi}_2$  и  $\text{Mo}_{4,8}\text{Si}_3\text{C}_{0,6}$  (состав 1);  $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{MoB}$  и  $\text{HfC}$  (состав 2). Предложены механизмы реакционного взаимодействия в исследуемых системах с учетом образования углерода в результате пиролиза связующего в шликерных слоях и диффузии из подложки [2, 3]. Фаза  $\text{MoSi}_2$  образуется в результате диффузионного насыщения молибдена кремнием, в том числе по механизму реакционной диффузии через промежуточные силициды  $\text{Mo}_3\text{Si}$  и  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ . Синтез фазы Новотного  $\text{Mo}_{4,8}\text{Si}_3\text{C}_{0,6}$  включает науглероживание силицида  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  до предела насыщения, а далее его разложение на термодинамически стабильные фазы  $\text{Mo}_{4,8}\text{Si}_3\text{C}_{0,6}$  и  $\text{Mo}_2\text{C}$ . Установлено, что в присутствии  $\text{HfB}_2$  в реакционной системе  $\text{Mo}-\text{Si}-\text{C}$  не происходит образование фазы Новотного, а имеет место синтез фаз  $\text{MoB}$  и  $\text{HfC}$ . Показано, что это возможно в условиях одновременного испарения кремния и науглероживания реакционной массы. При этом состав продуктов синтеза обусловлен реализацией наибольшей разницы в электроотрицательности между гафнием и углеродом, с одной стороны, молибденом и бором – с другой, что определяет максимальное снижение внутренней энергии системы. Выводы подтверждены термодинамическими расчетами.

Приведены результаты исследований в области реакционного синтеза покрытий на основе  $\text{MoSi}_2$  на поверхности УККМ класса  $\text{C}_f/\text{C}-\text{SiC}$  из порошковой композиции в системе  $\text{Mo}-\text{HfSi}_2-\text{SiB}_4$  при 1620 °С и остаточном давлении  $\text{Ag} \sim 1$  Па. Методами РФА, СЭМ и ЭДС в структуре синтезированного слоя достоверно установлены фазы:  $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{MoB}$ ,  $\text{HfB}_2$  и  $\text{HfB}$ . Механизм взаимодействия предположительно включает разложение  $\text{SiB}_4$  на  $\text{SiB}_6$  и  $\text{Si}$ , диффузионное насыщение молибдена кремнием в условиях его частичного испарения, плавление  $\text{HfSi}_2$  с образованием расплава ( $3\text{Si} + \text{Hf}$ ) и фазы  $\text{HfSi}$ , растворение  $\text{SiB}_6$  и  $\text{HfSi}$  в расплаве с одновременным химическим взаимодействием между  $\text{Hf}$  и  $\text{B}$ , с одной стороны, и  $\text{Mo}$  и  $\text{B}$  – с другой.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01476, <https://rscf.ru/project/22-29-01476/>.*

## 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  $\text{MoSi}_2$  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  $\text{MoSi}_2$  методом реакционного синтеза / А. Н. Астапов, А. И. Матуляк // Электрометаллургия. – 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.