

где  $f^*(\varepsilon_u^*, \varepsilon_1', T_1, a_k^*)$  – новая универсальная функция, описывающая нелинейность диаграммы деформирования в осях  $\sigma^* \sim \varepsilon^*$ , причем согласно гипотезе Москвитина  $f^* = f'(\varepsilon_u^*, T_1, a_k^*)$ .

Сравнивая соотношения для пластины при нагружении из естественного состояния и для величин со звездочками, отмечаем, что они совпадают с точностью до обозначений. Поэтому решение задачи для величин со звездочками можно получить из приведенного решения путем некоторых замен. Например, если известно  $w' = w'(x, \varepsilon_u', \varepsilon_y', T, a_k')$ , то соответствующее перемещение со звездочкой будет  $w^* = w'(x, \varepsilon_u^*, \varepsilon_y^*, T_1, a_k^*)$ , а искомое перемещение  $w'' = w' - w^*$ . Численные результаты показывают существенное влияние физической нелинейности материалов и температуры на перемещения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БР ФФИ (проект № T22UZB-015).*

#### Список литературы

- 1 Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с.
- 2 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойных физически нелинейных стержней / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский. – М. : МАИ, 2016. – 184 с.
- 3 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
- 4 Kuznetsova, E. L. Methods of diagnostic of pipe mechanical damage using functional analysis, neural networks and method of finite elements / E. L. Kuznetsova, G. V. Fedotenkov, E. I. Starovoitov // INCAS Bulletin. – Vol. 12, Spec. is. – 2020. – P. 79–90.
- 5 Starovoitov, É. I. Vibrations of round three-layer plates under the action of distributed local loads / É. I. Starovoitov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaya // Strength of materials. – 2002. – Vol. 34, no. 5. – P. 474–481.
- 6 Gorshkov, A. G. Harmonic Vibrations of a Viscoelastoplastic Sandwich Cylindrical Shell / A. G. Gorshkov, É. I. Starovoitov, A. V. Yarovaya // International applied mechanics. – 2001. – Vol. 37, no. 9. – P. 1196–1203.
- 7 Горшков, А. Г. Колебания трехслойных стержней под действием локальных нагрузок различных форм / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества. – 2004. – № 1. – С. 45–52.
- 8 Могилевич, Л. И. Гидроупругость виброопоры с трехслойной круглой упругой пластиной с несжимаемым наполнителем / Л. И. Могилевич, В. С. Попов, Э. И. Старовойтов // Наука и техника транспорта. – 2006. – № 2. – С. 56–63.
- 9 Fedotenkov, G. V. Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G. V. Fedotenkov, D. V. Tarlakovsky, Y. A. Vahterova // Lobachevskii journal of mathematics. – 2019. – Vol. 40, № 4. – P. 439–447.
- 10 Вестяк, В. А. Распространение нестационарных объемных возмущений в упругой полуплоскости / В. А. Вестяк, А. С. Садков, Д. В. Тарлаковский // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – Т. 46, № 2. – С. 130–140.
- 11 Старовойтов, Э. И. Термосиловое нагружение трехслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1989. – № 5. – С. 114–119.
- 12 Захарчук, Ю. В. Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – № 10. – С. 55–66.
- 13 Захарчук, Ю. В. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11. – С. 80–87.
- 14 Козел, А. Г. Деформирование круговой трехслойной пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – № 32. – С. 235–240.
- 15 Козел, А. Г. Решение задачи об изгибе упругопластической круговой пластины на основании пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – 2019. – № 34. – С. 165–171.
- 16 Нестерович, А. В. Радиальное и тангенциальное неосесимметричное нагружение круговой трехслойной пластины / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2020. – № 13. – С. 116–121.
- 17 Нестерович, А. В. Неосесимметричное нагружение трехслойной круговой пластины в своей плоскости / А. В. Нестерович. – 2020. – № 35. – С. 246–252.
- 18 Deformation of a Step Composite Beam in a Temperature Field / É. I. Starovoitov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, no. 4. – P. 1023–1029.

УДК 666.762

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ УККМ В СКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ

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

Исследование посвящено разработке сверхвысокотемпературного углерод-керамического композиционного материала (УККМ), перспективного для применения в теплонапряженных конструкциях скоростных маневрирующих летательных аппаратов и возвращаемых космических аппаратов [1–3].

Предложена и апробирована технология получения опытных образцов УККМ. Основные ее этапы включали [1]:

- подготовку препрега, состоящего из 10–12 слоев углеродной ткани, пропитанной связующим, содержащим суспендированный полидисперсный порошковый наполнитель;
- формование заготовок и отверждение смолы при температуре 220–230 °С, удельном давлении 60 МПа и времени прессования и 45 мин соответственно;
- карбонизацию в среде инертного газа при атмосферном давлении и температуре 850–900 °С;
- высокотемпературную термическую обработку заготовок при  $1755 \pm 5$  °С и давлении разрежения аргона 10 Па для реакционного синтеза и формирования керамической составляющей матрицы. Продолжительность изотермы – 30 мин;
- пироуплотнение заготовок в среде метана при температуре 900–1000 °С и давлении 4–5 кПа.

Армирующей составляющей выступала углеродная ткань на основе гидратцеллюлозы (вискозы). В качестве связующего применяли разработанный кремнийорганический полимер на основе полиорганосилазановой смолы 143–115 (раствор полидиметилфенилсилазана в толуоле). В качестве наполнителя использовали полидисперсную порошковую композицию (реакционную смесь) в системе Hf–Nb–V<sub>4</sub>C–TiC–TiB<sub>2</sub>. Нанесение связующего с суспендированным наполнителем на ткань осуществляли напылением из краскораспылителя с последующей обработкой шпателем. При высокотемпературной термической обработке происходит *in situ* синтез боридов HfB<sub>2</sub>, NbB<sub>2</sub> и карбидов HfC, NbC в результате реакционного взаимодействия в системе Hf–Nb–V<sub>4</sub>C [2, 3]. Полученная матрица УККМ является комбинированной – состоит из частично спеченной керамики в системе HfB<sub>2</sub>–NbB<sub>2</sub>–TiB<sub>2</sub>–HfC–NbC–TiC–V<sub>4</sub>C, пиролитического углерода и пиролизного остатка кремнийорганического связующего, представленного SiC и аморфизированным углеродом. Доля фазы SiC в составе УККМ низкая и оценивается ~ 8,5–9 мас. %.

Проведены газодинамические огневые испытания образцов УККМ на аэродинамическом стенде ФАУ «ЦАГИ» (г. Жуковский), оснащенном индукционным плазмотроном. Моделировали процессы термохимического взаимодействия образцов со скоростным потоком воздушной плазмы для условий полета перспективных возвращаемых летательных аппаратов в атмосфере Земли на высоте 80–100 км. Температура на лицевой поверхности образцов ступенчато изменялась в диапазоне от  $T_w = 1400$  до  $2700$  °С. Вместе с тем тыльная поверхность образцов не нагревалась выше  $T_w = 1750...1800$  °С, что свидетельствует о высоких теплоизоляционных (термобарьерных) свойствах созданного УККМ. Общее время каждого огневого эксперимента составило 300 с. Средняя скорость линейного уноса и средняя скорость потери массы образцами за всё время каждого огневого эксперимента по данному режиму составили 0,0063 мм/с и 0,00622 г/с соответственно.

Установлено, что при взаимодействии УККМ с потоком на его поверхности образуется гетерогенная оксидная пленка, представленная смесью сложных оксидов, близких по химическому составу к фазам Hf<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>2</sub>, TiNbO<sub>4</sub> / (Ti<sub>1-x</sub>Hf<sub>x</sub>)NbO<sub>4</sub> и Nb<sub>2</sub>O<sub>5-x</sub>, а также незначительной долей отдельных частиц фазы HfO<sub>2</sub> в кубической модификации. Толщина оксидного слоя варьируется от 0,8–1,5 мм (в эпицентре воздействия потока) до 0,2–0,3 мм (вдали от эпицентра) в зависимости от рельефа подложки. Показано, что окисление композита протекает преимущественно в диффузионном режиме благодаря образованию на его поверхности оксидной пленки, газоплотность которой возрастает в результате перехода в жидкотекучее состояние по мере увеличения рабочей температуры. Отмечено, что наряду с окислением углерода атомами кислорода, непосредственно диффундировавшими через оксидный слой, имеет место его окисление путем взаимодействия с оксидными фазами пленки. Отмечено, что взаимодействие углерода с оксидами, содержащими гафний (HfO<sub>2</sub>, Hf<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>2</sub>), является предпочтительным.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10258-П, <https://rscf.ru/project/22-79-41035/>.*

#### Список литературы

- 1 Технологические аспекты получения УККМ / А. С. Горохов [и др.] // Аэрокосмическая декада : сб. тр. XIV Всерос. науч.-техн. студенческой школы-семинара, Алушта, 26 сентября – 02 октября 2021 г. – Симферополь : АРИАЛ, 2021. – С. 33–36.
- 2 Синтез *in situ* матриц жаропрочных композиционных материалов и жаростойких защитных покрытий / А. Н. Астапов // Авиация и космонавтика : тез. докл. XX Междунар. конф., Москва, 22–26 ноября 2021 г. – М. : Перо, 2021. – С. 475–476.
- 3 Сукманов, И. В. Реакционное взаимодействие в системах V<sub>4</sub>C–Hf–Nb и V<sub>4</sub>C–C–Hf–Nb / И. В. Сукманов // Гагаринские чтения – 2022 : сб. тезис. работ XLVIII Междунар. молодежной науч. конф., Москва, 12–15 апреля 2022 г. – М. : Перо, 2022. – С. 547–548.