



Рисунок 3 – Результаты эксперимента на сжатие образца углепластика с ударным повреждением: а) диаграмма нагружения экспериментального и моделируемого образцов; б) поля деформаций для моделируемого образца; в) результаты DIC для натурального образца

### Список литературы

1. Фейгенбаум Ю. М., Дубинский С. В., Божевалов Д. Г., Соколов Ю. С., Метелкин Е. С., Миколайчук Ю. А., Шапкин В. С. Обеспечение прочности композитных авиационных конструкций с учетом случайных эксплуатационных ударных воздействий. — М.: Техносфера, 2018. — 228 с.
2. ASTM-D7137, Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates, Tech. rep. West Conshohocken (PA, USA): American Society for Testing and Materials (ASTM), 2007.
3. Hashin Z. Fatigue failure criteria for unidirectional fiber composites. – 1981.

## ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ

*Н.Д. КУЛАГИН<sup>1,2</sup>, А.Г. БУРЛАЧЕНКО<sup>2</sup>, Е.С. ДЕДОВА<sup>1,2</sup>, С.П. БУЯКОВА<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [ndi1@tpu.ru](mailto:ndi1@tpu.ru)

**Введение.** Высокотемпературные многокомпонентные керамические материалы на основе карбидов являются перспективными конструкционными материалами, так как они обладают лучшими тепловыми и термомеханическими свойствами, чем монофазные керамические карбидные материалы. Исследование окислительного поведения многокомпонентных керамических материалов на основе карбидов является малоизученным направлением ввиду сложности процессов формирования оксидного слоя: образование большого числа оксидов металлов и их комплексность. Целью настоящей работы является изучение окислительного поведения многокомпонентной керамики (Ti, Zr, Hf)C.

**Экспериментальная часть.** Материалом для исследований служила многокомпонентная карбидная керамика (Ti, Zr, Hf)C. Полученные смеси порошков подвергались механической обработке. Образцы керамических материалов получены спеканием при температуре 1900°C при давлении 30 МПа в течение 30 минут в атмосфере аргона. Микроструктура керамических образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50. Исследование окислительного поведения образцов керамики проводилось методом высокотемпературного рентгенофазового анализа с использованием Cu-K $\alpha$  излучения (40 кВ/30 мА), скорость нагрева – 10 °С/мин, шаг съёмки – 20 °С/кадр на дифрактометре (Shimadzu, Япония). Термогравиметрический (ТГ) анализ образцов выполняли на дериватографе «Q-1000» фирмы «МОМ» (Венгрия). Скорость нагрева печи составляла 5°С/мин от комнатной температуры до 1050°С.

**Результаты.** Согласно проведённым рентгеновским *in situ* исследованиям в температурном интервале от 25 до 1200 °С, на рентгенограммах, соответствующих керамикам, нагретых в интервале температур от 25 до 760 °С, присутствовали пики, соответствующие кубической фазе многокомпонентного твердого раствора (Ti, Zr, Hf)C с ГЦК структурой. Дальнейшее повышение температуры привело к изменению рентгеновской картины, а именно, на дифрактограммах регистрировались максимумы, принадлежащие орторомбическим фазам (Zr,Ti)O<sub>2</sub> и (Zr,Hf)TiO<sub>4</sub>, а также моноклинной модификации ZrO<sub>2</sub>. Рефлексы, характеризующие твердый раствор (Ti, Zr, Hf)C, полностью исчезали при температуре 920 °С. Дальнейшее повышение температуры до 1200 оС привело к монотонному увеличению интенсивности пиков, принадлежащих оксидам.

Результаты термического анализа показали повышение массы образца выше 762 °С, что соответствует началу окисления керамических материалов (Ti, Zr, Hf)C.

Микроструктурные исследования показали, что на поверхности керамического твердого раствора формируется оксидный слой с фрагментированной структурой. Окисленный слой представлен относительно плотной структурой, на которой равномерно распределены множественные островковые скопления белых кристаллов, рост которых, вероятно, сопровождался образованием микротрещин. Развитая сетка поверхностных трещин формирует обособленные друг от друга блоки оксидов со средним размером 41±1,5 мкм. Толщина сформированного оксидного слоя составила ~180 мкм.

**Заключение.** В ходе выполнения работ были изучены структура, свойства и окислительное поведение многокомпонентного керамического материала (Ti, Zr, Hf)C, полученного спеканием под давлением. Исследование окислительного поведения показало, что твердый раствор (Ti, Zr, Hf)C оставался стабильным в процессе нагрева на воздухе вплоть до 760 °С. Дальнейший рост температуры привел к распаду твердого раствора (Ti, Zr, Hf)C с образованием оксидов (Zr,Ti)O<sub>2</sub>, (Hf,Zr)TiO<sub>4</sub>. Толщина сформированного оксидного слоя составила ~ 180 мкм. Оксидный слой представляет собой блочную структуру со средним размером блоков 41±1,5 мкм.

*Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда №22-22-00805.*