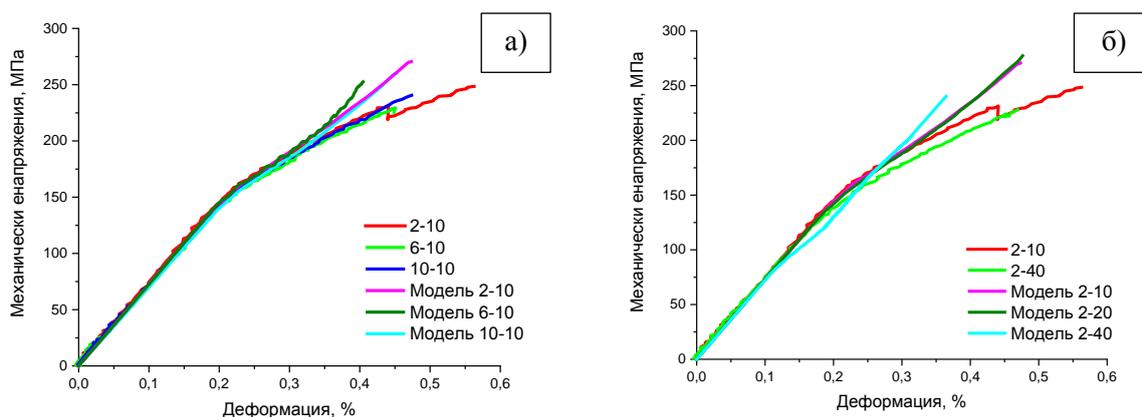


результаты определения прочности на сжатие пластин при данных условиях проведения эксперимента, что связано с потерей устойчивости образцов и возникновением изгибной деформации, что также подтверждается аналитическими расчетами. При этом данные моделирования и натурного эксперимента имеют хорошее соответствие.

Отмечено, что глубина залегания (рисунок 1а) и размер дефекта (рисунок 1б) не оказывают значительного влияния на остаточную прочность углепластика, так как во всех образцах происходит общая потеря устойчивости. Разрушение образца при проведении натурного эксперимента происходит под захватами испытательной машины, из-за концентрации напряжения вблизи точки закрепления. При моделировании образцы все без исключения разрушались по центру, что объясняется некоторой идеализацией эксперимента в модели. Также данный факт объясняет несколько завышенные показатели остаточной прочности при моделировании.



а) дефект диаметром 10мм; б) 2 слоя

Рисунок 1 – Диаграмма нагружения на сжатие образцов углепластика в зависимости от глубины залегания и размера дефекта

### Список литературы

1. Молчанов Б. И., Гудимов М. М. Свойства углепластиков и области их применения //Авиационная промышленность. – 1997. – №. 3-4. – С. 58-60.
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.

## ИСПЫТАНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ С УДАРНЫМ ПОВРЕЖДЕНИЕМ: МОДЕЛЬ И ЭКСПЕРИМЕНТ

*А.А. КОНОНОВА, М.В. БУРКОВ*

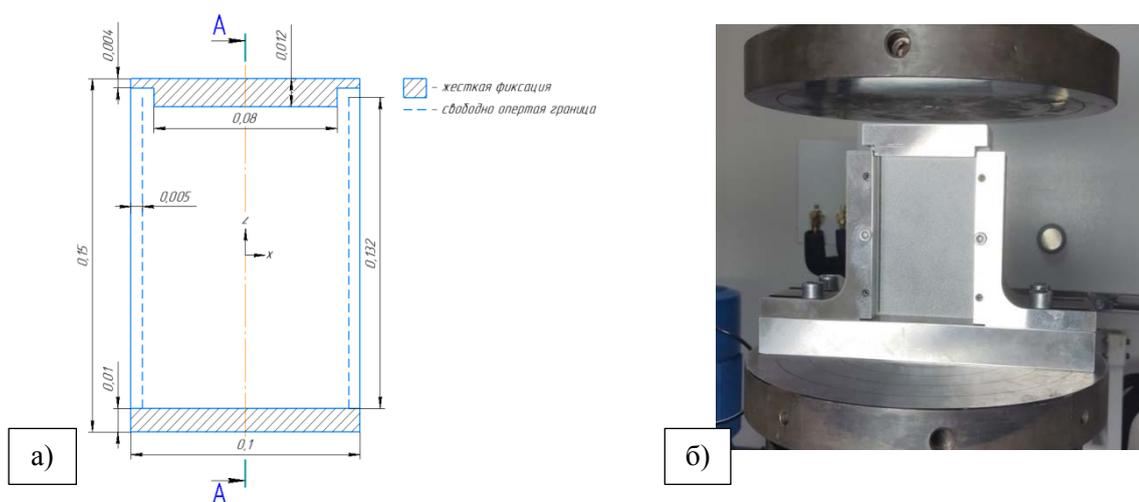
Томский политехнический университет

E-mail: [aak202@tpu.ru](mailto:aak202@tpu.ru)

Ударные повреждения оказывают значительное влияние на остаточную прочность композитных материалов [1]. Одним из эффективных способов изучения механики повреждений, понимания принципов, лежащих в основе различных методов испытаний,

является совместный анализ экспериментов и компьютерного моделирования. Разработка надежных компьютерных моделей на основе данных натуральных экспериментов позволяет снизить финансовые и временные затраты при изучении механизмов разрушения и прогнозировании остаточной прочности композитных материалов с ударными повреждениями. Целью данной работы является определение остаточной прочности на сжатие углепластиков с ударным повреждением с помощью компьютерного моделирования и натурального эксперимента.

В данной работе объектом исследования являлась композитная пластина с размерами 100x150 мм поврежденная ударом с энергией 8.55Дж ( $v=1.79\text{м/с}$ ). Толщина образцов 2.5 мм, укладка  $[0/90]_{5S}$ . Углепластики подвергались испытанию на остаточную прочность по стандарту ASTM D 7137 (рисунок 1) [2] и моделировались МКЭ с помощью ABAQUS и подпрограммы VUMAT, реализующей повреждения по критерию Хашина [3].



а) схема закрепления; б) образец в оснастке

Рисунок 1 – Закрепления образца для испытания по стандарту ASTM D 7137

На рисунке 2 приведена диаграмма нагружения на сжатие бездефектного образца углепластика, полученная в результате моделирования. Так же на рисунке 1а представлены изгибные деформации моделируемой пластины в вертикальном сечении А-А. Как можно заметить из рисунка 2, точка 2 является началом потери устойчивости пластины и возникновения изгибных деформаций. По мере увеличения нагрузки (точка 3) до разрушения (точка 4) происходит увеличение изгиба пластины до максимального значения – 6.34мм, после которого происходит полное разрушение пластины по центру из-за общей потери устойчивости.

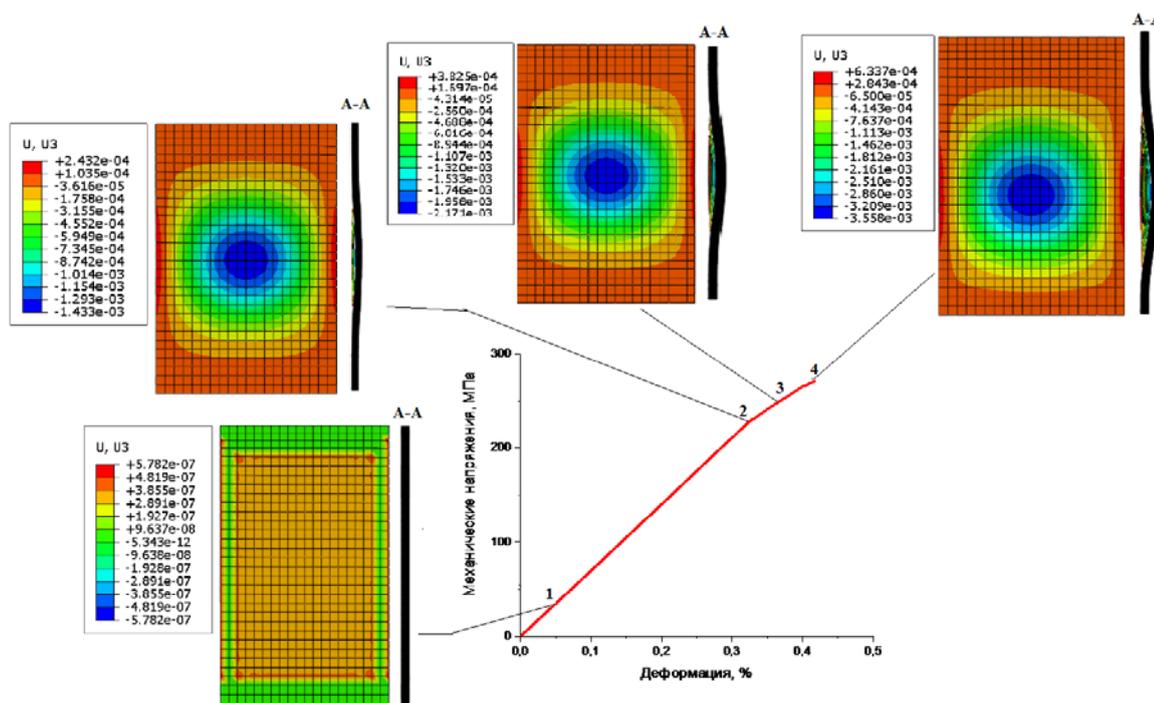


Рисунок 2 – Диаграмма нагружения на сжатие бездефектного образца углепластика, полученная в результате моделирования

В таблице 1 приведены результаты расчета остаточной прочности на сжатие в SIMULIA ABAQUS, а также результатов аналитического расчета напряжения потери устойчивости при такой схеме нагружения и данные натуральных экспериментов.

Таблица 1 – Результаты экспериментов

Скорость удара, м/с	Натурный эксперимент		Моделирование		Аналитический расчет
	Остаточная прочность, МПа	Деформация разрушения, %	Остаточная прочность, МПа	Деформация разрушения, %	Критическое напряжение потери устойчивости, МПа
1.79	253.45	0.62	259.70	0.50	265.99

В результате сравнения данных натурального эксперимента и моделирования, можно сделать вывод, что выбранная толщина образца и схема укладки не позволяет получить достоверные результаты для разрушения образца по схеме чистого сжатия при данных условиях проведения эксперимента. Это связано с потерей устойчивости образцов и возникновением изгибной деформации, что также подтверждается аналитическими расчетами.

Данные моделирования и натурального эксперимента имеют хорошее соответствие (рисунок 3). Разрушение образца при проведении натурального эксперимента происходит под захватами из-за концентрации напряжения вблизи точки закрепления. При моделировании образец разрушался по центру, что объясняется некоторой идеализацией эксперимента в модели. Также данный факт объясняет несколько завышенные показатели остаточной прочности при моделировании (рисунок 3а).

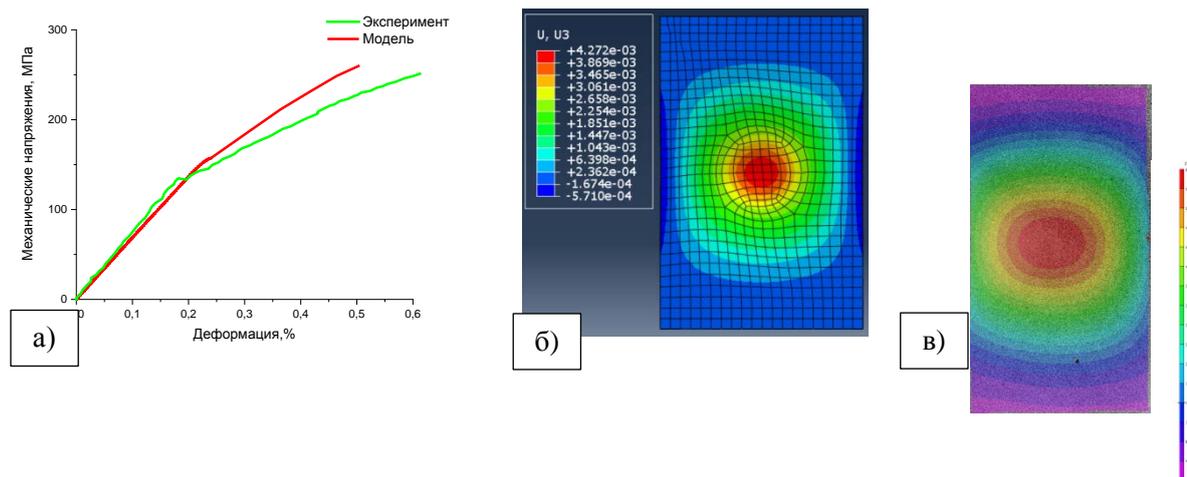


Рисунок 3 – Результаты эксперимента на сжатие образца углепластика с ударным повреждением: а) диаграмма нагружения экспериментального и моделируемого образцов; б) поля деформаций для моделируемого образца; в) результаты DIC для натурального образца

### 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.