

УДК 539.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ\*

© 2014 г. П.А. Моссаковский<sup>1</sup>, Ф.К. Антонов<sup>1</sup>, Т.А. Белякова<sup>1</sup>,  
Л.А. Костырева<sup>1</sup>, А.М. Брагов<sup>2</sup>, В.В. Баландин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

balandin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 12.12.2013

Рассматривается моделирование тканого композита на основе арамидных волокон. Проведены экспериментальные исследования, включающие в себя статические испытания, динамические тесты по методу Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона и баллистические ударные тесты. Построена редуцированная модель тканого композита, позволяющая существенно сократить необходимые для исследования вычислительные ресурсы. Проведены расчеты поведения тканого композита при ударе, осуществлено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Отмечено хорошее качественное и количественное соответствие результатов расчетов и экспериментов.

*Ключевые слова:* тканый композит, полномасштабная модель, определяющие соотношения, редуцированная модель, конечно-элементный анализ, баллистический эксперимент.

### Введение

В настоящее время тканые композиты широко применяются во многих промышленных областях, таких как производство средств индивидуальной защиты, авиация, космонавтика и другие. Многие конструкции эксплуатируются в условиях сложного динамического нагружения, подвергаются ударным нагрузкам. Поэтому для повышения надежности изделий из тканых композитных материалов необходимо детальное изучение их механических свойств и построение адекватных математических моделей деформирования.

Для широкого круга практических приложений необходимо качественно моделировать поведение тканых композитов в условиях сложного динамического нагружения. В настоящее время этой проблеме посвящено большое количество исследований, которые можно условно разделить на два основных направления. Одно из

---

\* Выполнено при поддержке РФФИ (гранты 13-08-00706а, 12-08-01227а и 13-01-90406 Укр\_ф\_а) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8).

них занимается микро- или полномасштабным моделированием материала, учитывающим внутреннюю геометрическую структуру [1]. Такой подход требует огромных вычислительных ресурсов, но при этом позволяет использовать довольно простые определяющие соотношения для описания отдельных нитей композита. Параметры моделей (геометрия волокон, упругие модули, критерии разрушения) могут быть в этом случае определены непосредственно из эксперимента [2]. Другое направление занимается макромоделированием [3] и основано на осреднении свойств материала по объему. В итоге композит представляется анизотропным телом со сложными нелинейными свойствами, что затрудняет построение единого критерия разрушения. Нелинейность свойств такого композита связана с локальным разрушением и внутренним межволоконным трением. В большинстве случаев для моделирования применяют конечные элементы типа shell с несколькими точками интегрирования по толщине и классические ламинатные теории [4]. В настоящей статье тканый композит представлен в виде многослойной оболочки из однородных ортотропных слоев. Межволоконное трение не учитывалось. Предполагалось, что материал вплоть до разрушения ведет себя линейно. Упругие характеристики материала определены по результатам сравнения итогов статических и динамических испытаний с результатами, полученными в рамках построенной полномасштабной модели. Приведены данные по моделированию композитного материала «Русар», сформированного на основе арамидных волокон. В качестве вычислителя использовался пакет программ LS – DYNA [4].

### 1. Полномасштабное моделирование

Полномасштабное моделирование выполнено с детализацией отдельных нитей материала. Важную роль при этом играет различие в геометрии нитей утка и основы,

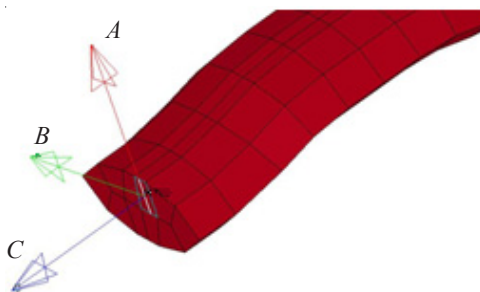


Рис. 1

поскольку оно влияет на начальные упругие характеристики слоя и величину критических параметров разрушения.

Каждая нить является упругим трансверсально-изотропным телом, одна из материальных осей которого совпадает с продольным направлением нити (рис. 1).

Матрица жесткости материала симметрична:

$$C_L^{-1} = \begin{pmatrix} 1/E_a & -\nu_{ba}/E_b & -\nu_{ca}/E_c & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{ab}/E_a & 1/E_b & -\nu_{cb}/E_c & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{ac}/E_a & -\nu_{bc}/E_b & 1/E_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{ca} \end{pmatrix}.$$

Предполагается, что нить сопротивляется только продольному растяжению, вследствие чего все упругие модули малы в сравнении с  $E_c$ . Исходя из гипотезы несжи-

маемости поперечного сечения нити и из соотношения для первого инварианта тензора деформаций

$$\theta = \frac{\sigma_a}{E_a}(1 - \nu_{ab} - \nu_{ac}) + \frac{\sigma_b}{E_b}(1 - \nu_{ba} - \nu_{bc}) + \frac{\sigma_c}{E_c}(1 - \nu_{ca} - \nu_{cb}),$$

получаем дополнительное условие для коэффициентов Пуассона:

$$\nu_{ab} + \nu_{ac} = 1, \quad \nu_{ba} + \nu_{bc} = 1.$$

Параметры использованной в расчетах модели определялись по результатам статических и динамических испытаний материала «Русар» на растяжение, проведенных в НИИ механики ННГУ [5]. Значения полученных упругих постоянных приведены в таблице 1.

Таблица 1

|        | $E_a$ , ГПа | $E_b$ , ГПа | $E_c$ , ГПа | $G_{ab}$ , ГПа | $G_{bc}$ , ГПа | $G_{ca}$ , ГПа | $\nu_{ba}$ | $\nu_{cb}$ | $\nu_{ca}$ |
|--------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|
| Основа | 0,38        | 0,38        | 38          | 0,1            | 0,1            | 0,1            | 0,997      | 0,3        | 0,3        |
| Уток   | 0,42        | 0,42        | 42          | 0,1            | 0,1            | 0,1            | 0,997      | 0,3        | 0,3        |

Взаимодействие нитей утка и основы учитывалось введением следующей модели трения:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_n = -\bar{\nu}_{ab}, \\ \tau_n = \nu_{ab}, \\ \tau_n = \min\{\mu_c, p_n, VC\}, \quad \mu_c = FS, \end{cases}$$

где  $\nu_{ab}$  – относительная скорость контактной пары;  $\tau_n$  и  $p_n$  – тангенциальная и нормальная составляющие контактной силы;  $\mu_c$  – коэффициент трения;  $FS = 0,5$ ;  $VC = 0,22$  МПа – коэффициент вязкого трения. Эти коэффициенты были определены по результатам опытов по выдергиванию отдельных нитей из полотна [5].

В заключение была проведена серия баллистических тестов с различными типами образцов, содержащих от 1 до 100 слоев, с чередованием укладки соседних слоев. Эксперименты проводились в НИИМ ННГУ на установке, описанной в [6]. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов осуществлялось по различным параметрам, характеризующим процесс ударного взаимодействия как качественно (геометрия мишени в различные моменты времени, характер разрушения тканевого композита и т.д.), так и количественно (перемещение, остаточная скорость ударника и т.д.) [5]. Остаточные скорости в расчетах и экспериментах отличаются не более чем на 10%.

В качестве примера на рис. 2 представлены сравнительные результаты натуральных (слева) и виртуальных (справа) тестов по нормальному удару 10-слойной преграды. Скорость удара 269 м/с, время – 175 мкс после начала соударения.

На рис. 3 представлены результаты баллистических испытаний (удар под углом 45°) 20-слойной мишени, слева – эксперимент, справа – расчет. Скорость удара 380 м/с, время – 100 мкс после начала соударения.

Видно, что результаты эксперимента и численного расчета в соответствующие моменты времени качественно совпадают.

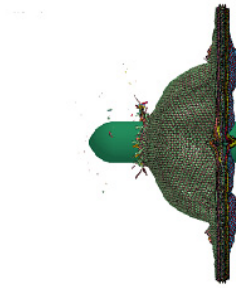


Рис. 2

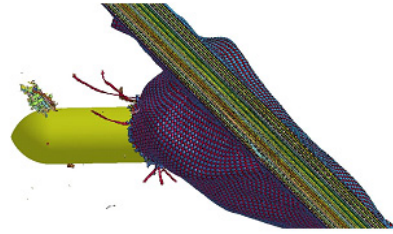
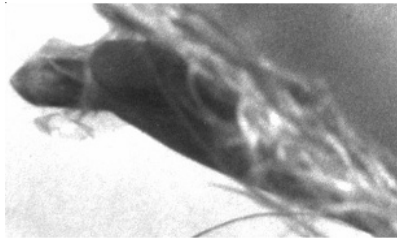


Рис. 3

## 2. Макромоделирование тканого многослойного композита

Наиболее реалистичное описание поведения тканого композита под действием динамического нагружения получается путем полномасштабного моделирования с детализацией каждого волокна (см. рис. 2, 3). Однако такой подход возможен лишь при малых размерах исследуемых изделий. К примеру, конечная модель однослойного образца размером  $50 \times 50 \text{ мм}^2$  содержит порядка миллиона элементов. Таким образом, даже при наличии современных вычислительных мощностей моделирование реальных процессов, таких как обрыв лопатки вентилятора газотурбинного двигателя, не представляется возможным. Поэтому в настоящем исследовании в качестве модели одного слоя рассматриваемого тканого композита предложена модель ортотропного упругого тела, материальные оси  $a$  и  $b$  которого направлены соответственно по утку и основе. Фрагмент конечно-элементной редуцированной модели показан на рис. 4.

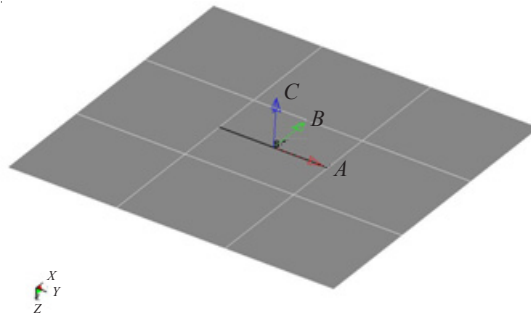


Рис. 4

В модели используются 8-узловые элементы типа shell с тремя точками интегрирования по толщине.

Упругие характеристики материала, полученные в соответствии с полномасштабной моделью, приведены в таблице 2.

Таблица 2

| $E_a$ , ГПа | $E_b$ , ГПа | $E_c$ , ГПа | $G_{ab}$ , ГПа | $G_{bc}$ , ГПа | $G_{ca}$ , ГПа | $\nu_{ba}$ | $\nu_{cb}$ | $\nu_{ca}$ |
|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|
| 42          | 38          | 5           | 0,1            | 0,1            | 0,1            | 0,32       | 0,02       | 0,05       |

В рамках линейно-упругой модели материала локальное разрушение материала задавалось при помощи карты \*MAT\_ADD\_EROSION двумя параметрами

$$MXEPS = 8\%, \quad SIGP1 = 700 \text{ МПа.}$$

Здесь  $MXEPS$  – предельное значение первой главной деформации, которое соответствует деформации разрушения нити утка,  $SIGP1$  – предельное первое главное напряжение, которое является своего рода «переключателем», разделяющим большие сдвиговые деформации нити, на практике не приводящие к ее разрушению, от продольных деформаций растяжения, имеющих первостепенное значение.

Параметры модели трения между тканью и ударником приведены в таблице 3.

Таблица 3

| $FS$ | $VC$ , МПа |
|------|------------|
| 0,5  | 0,22       |

Такой подход дает значительную экономию вычислительных ресурсов: однослойный образец размером  $50 \times 50 \text{ мм}^2$  содержит примерно 10 000 элементов. Однако реальные конструкции описываются десятками миллионов элементов. Поэтому было предложено моделировать многослойный тканый пакет специальными элементами типа shell, содержащими внутри себя несколько тканых слоев с чередованием укладки, что достигается путем применения карты \*INTEGRATION\_SHELL. Сравнительные результаты расчетов и баллистических тестов изображены на рис. 5, 6.

На рис. 5 приведены экспериментальные и расчетные результаты по пробиванию четырехслойного образца при скорости удара 266 м/с (эксперимент – кадры  $a, в, д$ , расчет –  $б, з, е$ ). Интервал между последовательными кадрами составляет 25 мкс. Остаточная скорость ударника в эксперименте – 250 м/с, в расчете – 258 м/с.

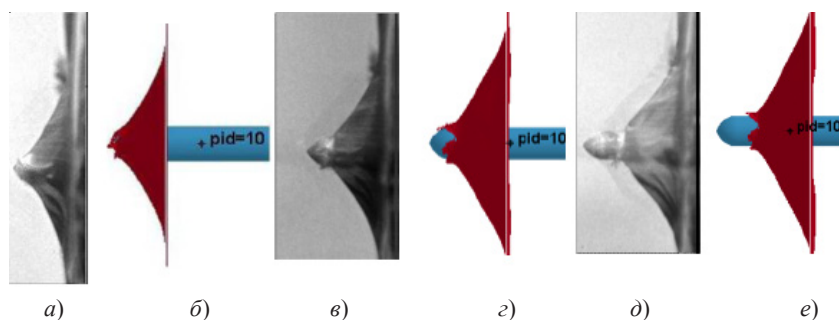


Рис. 5

На рис. 6 сравниваются эксперимент и расчет для пробивания сорокаслойного образца при скорости удара 380 м/с (эксперимент – кадры  $a, в, д$ , расчет –  $б, з, е$ ).

Временной интервал между последовательными кадрами в эксперименте и расчете – 25 мкс. Остаточная скорость ударника в эксперименте – 300 м/с, в расчете – 280 м/с.

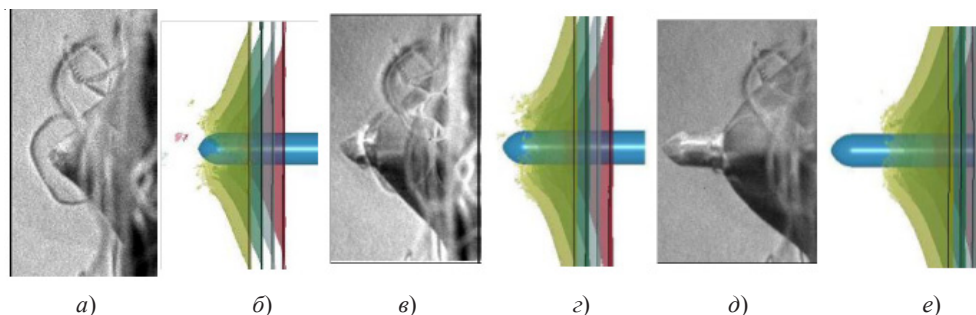


Рис. 6

Видно, что экспериментальные и расчетные результаты качественно и количественно хорошо соответствуют друг другу.

Необходимо отметить, что последний подход имеет ряд недостатков. Во-первых, с ростом числа точек интегрирования по толщине элемента чрезмерно увеличивается и его изгибная жесткость, что приводит к необходимости значительной корректировки критерия разрушения и качественному расхождению результатов натуральных и виртуальных баллистических испытаний. Во-вторых, ограничена возможность моделирования эффекта расслоения композита и межслойного взаимодействия. Поэтому рекомендуется строить модели с достаточным количеством геометрических слоев (5–10). Таким образом, можно прийти к заключению, что оптимальным вариантом является тот, при котором каждый виртуальный слой соответствует 4–10 физическим слоям.

### Выводы

Выполнены баллистические испытания многослойных тканевых композитов «Русар» при ударе по нормали и под углом  $45^\circ$ .

С использованием пакета программ LS-DYNA осуществлены виртуальные эксперименты по моделированию пробивания тканевых пакетов жёстким ударником. Проведенное сравнение результатов натуральных и виртуальных экспериментов показало их хорошее качественное соответствие.

### Список литературы

1. A simple global/local approach to modeling ballistic impact onto woven fabrics / M.P. Rao, M. Keefe, B.M. Powers, T.A. Bogetti // 10th International LS-DYNA Users Conference. 2010. P. 9-55–9-66.
2. Simmons J., Erlich D., Shockey D. Explicit FEA modeling of multilayer composite fabric for gas turbine engines containment systems. Part 3: Model development and simulation of experiments // FAA report DOT/FAA/AR-04/40, P3. November, 2004.
3. Tabiei A., Ivanov I. Computational micro-mechanical model of flexible woven fabric for finite element impact simulation // IJNME. 2002. 53 (6). P. 1259–1276.
4. LS-DYNA. Theory Manual. March, 2006.
5. Experimental investigation and FE analysis of fiber woven layered composites under dynamic loading / P.A. Mossakovsky, F.K. Antonov, M.E. Kolotnikov, L.A. Kostyreva, A.M. Bragov, V.V. Balandin // 12th International LS-DYNA Users Conference. Constitutive Modeling (2). 2012.

P. 1–8 (<http://www.dynalook.com/international-conf-2012/constitutivemodeling12-c.pdf>).

6. Баландин В.В., Брагов А.М. Лабораторная установка для изучения процессов соударения // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1990. С. 112–115.

#### **THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND FE-ANALYSIS OF WOVEN COMPOSITES UNDER IMPACT LOADING**

**P.A. Mossakovskiy, F.K. Antonov, T.A. Belyakova, L.A. Kostyreva,  
A.M. Bragov, V.V. Balandin**

The paper considers modeling an aramide fiber woven composite. The experimental study has been done, including statistic tests, dynamic tests using Kolsky method with the Split Hopkinson Bar, and ballistic impact tests. A reduced model of a woven composite is constructed that would considerably reduce the computational resource required for the investigation. The response of the woven composite under impact loading has been computed; the results obtained have been compared with experimental data. Good quantitative and qualitative agreement between the computational and experimental results is noted.

*Keywords:* woven composite, full-scale model, determining relations, reduced model, FE-analysis, ballistic experiment.