

*С. Ф. Хванг\**, *С. И. Ву*

*Department of Mechanical Engineering, National Yunlin University of Science and Technology,  
123 University Road, Sec. 3, Douliu, Yunlin 64002, Taiwan, ROC*

## **УДАРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ЭНЕРГОПОГЛОЩЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТКАНИ ИЛИ ПРЕПРЕГОВ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН<sup>1</sup>**

*S. F. Hwang\* and C. Y. Wu*

### **IMPACT BEHAVIOR AND ENERGY ABSORPTION OF COMPOSITE TUBES MADE FROM FIBER FABRICS OR PREPREGS**

**Keywords:** impact energy absorption, composite tube, fabric, prepreg, finite-element analysis

The impact behavior and energy absorption of two types of composite tubes, fabricated from carbon fabrics by the resin transfer molding and from carbon prepregs by the lay-up method, were investigated experimentally and numerically. In impact tests, outward-splaying crush caps with different fillet radii were used. Different types of crushing behavior of the tubes were simulated by the finite-element analysis, including a progressive failure function and considering the possibility of delamination. A comparison with experimental results confirmed that the finite-element analysis was able to well predict the crushing behavior of the composite tubes, showing that the specific energy absorption of the prepreg composite tubes was always about 20% lower than that of the braided ones.

**Ключевые слова:** поглощение энергии удара, труба композитная, ткань, препрег, анализ конечно-элементный

Поведение при ударе и энергопоглощение двух типов композитных труб, изготовленных из тканей углеродных волокон методом литьевого прессования и препрегов углеродных волокон методом укладки, исследовали экспериментально и численно. При

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [hwangsf@yuntech.edu.tw](mailto:hwangsf@yuntech.edu.tw)  
Corresponding author: [hwangsf@yuntech.edu.tw](mailto:hwangsf@yuntech.edu.tw)

<sup>1</sup>Перевод с англ.

испытаниях на удар использовали заглушки с разным радиусом скругления. С помощью анализа методом конечных элементов моделировали разные типы смятия труб, включая функцию прогрессирующего разрушения и возможность расслоения. Сравнение с экспериментальными результатами подтвердило, что анализ методом конечных элементов позволяет хорошо предсказать характеристики смятия композитных труб, демонстрируя, что удельное энергопоглощение композитных труб из препрега всегда примерно на 20% меньше, чем плетеных.

## Введение

Композитные трубы — хорошая альтернатива для энергопоглощающих компонентов в передней боковой балке для обеспечения ударопрочности автомобиля в силу их малой массы и высокой энергопоглощающей способности по сравнению с металлическими трубами. Для количественной оценки способности материала поглощать энергию используют его удельное энергопоглощение (УЭП), определяемое как поглощенная энергия, деленная на массу материала. Например, УЭП композитных труб может достигать 60—80 Дж/г в зависимости от их геометрии и конструкции [1, 2], стальных труб — меньше 20 Дж/г [3, 4], алюминиевых — ~ 30 Дж/г [5].

Для оценки ударопрочности композитных труб обычно проводят испытания на осевое сжатие с постоянной скоростью нагружения [6—9], а динамической природе удара автомобиля и авиакатастрофы соответствуют испытания на осевой удар [10—12]. Во избежание хрупкого поведения композитных материалов обычно используют трубы со скошенными торцами [7, 13] или торцевыми заглушками (crush caps) [6], позволяющими уменьшить начальную пиковую нагрузку и инициировать прогрессирующее разрушение. В [14] для оценки УЭП усеченных композитных конусов выполнили испытания на осевое сжатие и удар. В ходе испытания на осевой удар в [15] установили, что УЭП прямоугольных труб меньше, чем их круглых аналогов, а УЭП композитных труб с укладкой  $[+\theta / -\theta]$  — минимальное при  $\theta = 15^\circ$ . В [16] провели квазистатические испытания на осевое смятие для измерения характеристик энергопоглощения круглыми композитными трубами, а также проанализировали влияние ориентации армирующих волокон в слоях. В [17] обсуждали влияние механизмов возникновения разрушения на способность энергопоглощения композитных труб при осевом сжатии. В [18] представлена инновационная заглушка трубы, на 53% повысившая эффективность энергопоглощения плетеных композитных труб по сравнению с традиционной заглушкой.

Для предсказания поведения композитных труб при смятии используют анализ методом конечных элементов (МКЭ), включающий функцию прогрессирующего разрушения в силу сложных механизмов повреждения (разрыв волокон, растрескивание матрицы и расслоение). В [10] для моделирования распространения повреждений, морфологии разрушения и энергопоглощения в трубах из плетеных композитов при осевом ударе

предложили модель, основанную на механике разрушения сплошной среды. В [19] модель прогрессирующего разрушения объединили с контактом связанного типа (tiebreak contact) для моделирования поведения круглых труб из эпоксидных слоистых углепластиков при смятии, имеющих два разных механизма инициирования разрушения. В [20] конечно-элементную модель с функцией прогрессирующего разрушения и расслоениями откалибровали, используя результаты испытаний плоских образцов, и применили для анализа смятия композитных труб, подвергнутых осевым ударным нагрузкам. В [21] предложили явную модель конечных элементов, разработанную для описания бокового разрушения труб из композитов на основе эпоксидной смолы и ткани из льняных волокон с учетом больших деформаций, пластичности и повреждений, и установили, что значения расчетной пиковой нагрузки и поглощенной энергии хорошо согласуются с экспериментальными.

Для изготовления композитных труб используют простой и дешевый метод укладки препрегов [6, 7]. Например, в [22] образцы труб изготовили методом ручной укладки. Однако у этого метода есть два недостатка — большое время изготовления и трудозатраты. Другая возможность — использование литьевого прессования [10, 23] для изготовления труб из тканых композитов. Например, в [24] изготовили круглые композитные трубы из ткани углеродных волокон и полиуретановой смолы методом литьевого прессования. Этот метод отличает короткое время формирования, простая переработка и возможность изготовления изделий сложной формы. В настоящей работе для изготовления композитных труб использовали оба этих метода.

## 1. Образцы и эксперимент

Композитные трубы изготовили из плетеных тканей углеродных волокон и эпоксидной смолы (называемых плетеными композитными трубами) и препрегов из углеродных волокон и эпоксидной смолы. Внешний диаметр плетеной композитной трубы 28,5 мм, толщина 2 мм, длина 100 мм (рис. 1). Двухосная плетеная углеродная ткань плотностью 600 г/м<sup>2</sup> изготовлена компанией Sheng Peng Applied Materials Corporation (Тайвань) из углеродного волокна TAIRYFIL TC-36S с 12 000 моноволокон, производимого компанией Formosa Plastics Corporation. Эпоксидное связующее, производимое компанией Everwide Chemical Corporation, состоит из смолы NF621-2 и отвердителя, смешиваемых в массовом соотношении 4:1. Перед инъекцией смолу вакуумировали в течение 40 мин для удаления пузырьков. Слои углеродной ткани укладывали на оправку в форме сплошного вала, помещали в пресс-форму, инжেকтировали смолу и прессовали заготовку при давлении 700 фунт/дюйм<sup>2</sup> и температуре 140 °С в течение одного часа. Угол плетения композитной трубы, измеренный после изготовления, ~45°, массовое содержание волокон ~56%.

Трубы из однонаправленного препрега на основе углеродного волокна TAIRYFIL TC-36P с 3000 моноволокон (компания Formosa Plastics

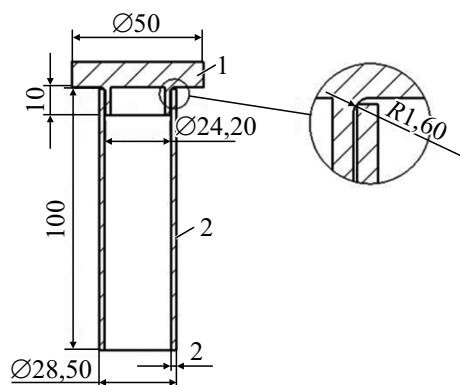


Рис. 1. Схема, размеры (мм) заглушки (1) и композитной трубы (2).

Corporation) и плотностью  $150 \text{ г/м}^2$ , пропитанного эпоксидной смолой, изготовили такой же толщины, как и трубы из плетеного композита. Для этого использовали 12 слоев препрега. Каждый слой препрега сворачивали вокруг оправки без нахлеста краев. Для реализации того же угла наклона волокон  $45^\circ$ , как в плетеной композитной трубе, выбрали последовательность укладки слоев в трубе из препрега  $[67,5^\circ / 112,5^\circ]_s$  (рис. 2). Для изготовления композитной трубы из препрега использовали двухэтапный цикл отверждения. На первом этапе в течение 30 мин поддерживали температуру  $120^\circ\text{C}$ . На втором этапе трубу подвергли воздействию давления  $700 \text{ фунт/дюйм}^2$  при температуре  $140^\circ\text{C}$  в течение одного часа. Внешний диаметр трубы из препрега  $28,5 \text{ мм}$ , длина  $100 \text{ мм}$ , толщина  $2 \text{ мм}$ . Массовое содержание волокон в композитной трубе из препрега  $\sim 60\%$ .

Трубы обоих типов изготовили без скоса торцов. Для реализации прогрессирующего разрушения в ходе испытания на удар верхний конец композитной трубы закрывали заглушкой, способной выворачивать

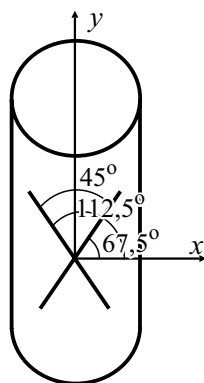


Рис. 2. Угол плетения ( $45^\circ$ ) и углы укладки ( $67,5$  и  $112,5^\circ$ ) слоев препрега с однонаправленными углеродными волокнами в трубах из плетеного композита и препрега соответственно.

поврежденный материал наружу. Нижний конец композитной трубы диаметром 30 мм вставили в стальное основание с соответствующим отверстием. Для обеспечения потенциальной энергии 430 Дж копер массой 22,5 кг сбрасывали с высоты 244,8 мм. Для измерения ускорения и силы удара к копру прикрепили акселерометр. Поглощенную энергию удара рассчитывали по диаграммам ударная нагрузка—перемещение смятия. В каждом случае испытывали по три образца.

## 2. Конечно-элементный анализ

Для моделирования процесса прогрессирующего разрушения двух типов композитных труб при ударном нагружении использовали программное обеспечение LS-DYNA в явной моде. Конечно-элементные сетки копра, заглушки и композитной трубы представлены на рис. 3. Сетку копра, рассматриваемого как жесткое тело, создали с помощью 8-узловых шестигранных твердотельных конечных элементов размером 5 мм. Для создания сетки заглушки, также рассматриваемой как жесткое тело, использовали оболочечные конечные элементы размером 2×2 мм.

Нижний 30-миллиметровый конец композитных труб обоих типов фиксировали. Сетку композитных труб создали, используя четырехузловые оболочечные конечные элементы размером 1×1 мм. Сетка плетеной трубы образована из 16 000 конечных элементов, а трубы из препрега — 61 054. Для моделирования двух слоев плетеного композита по толщине плетеной трубы использовали два оболочечных элемента. Таким образом, каждый оболочечный элемент представлял один слой плетеного композита. В настоящей работе механические свойства плетеного композита напрямую не определяли. Свойства соответствующих однонаправленных эпоксидных углепластиков определили в соответствии со стандартами ASTM:  $E_{11} = 124,4$  ГПа,  $E_{22} = 9,63$  ГПа,  $G_{12} = 7,81$  ГПа,  $\nu_{12} = 0,243$ ,  $X_t = 1288$  МПа,  $X_c = 580$  МПа,  $Y_t = 58$  МПа,  $Y_c = 194$  МПа.

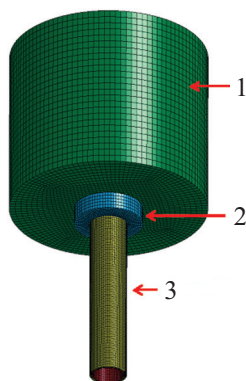


Рис. 3. Конечно-элементные сетка копра (1), заглушки (2) и композитной трубы (3).

В настоящей работе один слой плетеного композитного материала рассматривали как два однонаправленных слоя. Такой способ моделирования плетеного композитного слоя проверен в [25]. Сравнение с результатами испытаний показало, что модуль Юнга и прочность меньше на ~7,6 и 9,8% соответственно. Для каждого однонаправленного композитного слоя необходимо указать направление армирующих волокон, адекватное углу плетения. В расчетах для каждого однонаправленного слоя использовали одну точку и схему полного интегрирования.

В композитной трубе из 12-слойного препрега каждый слой оболочки представлял один слой композитного материала. Для моделирования операции сворачивания каждого слоя препрега место стыка его краев склеили полоской смолы, покрытой сеткой оболочечных конечных элементов размером  $1 \times 1$  мм и смоделированной как упругий идеально пластический материал с помощью инструмента MAT3 в LS-DYNA. В укладке  $[67,5_3^{\circ}/112,5_3^{\circ}]_s$  каждая группа из трех слоев имела одинаковый угол наклона волокон и одно и то же местоположение стыка, а четыре местоположения стыков равномерно распределили по окружности. Механические свойства композитов однонаправленного препрега определили в соответствии со стандартами ASTM: продольный модуль Юнга  $E_{11} = 128$  ГПа, поперечный модуль Юнга  $E_{22} = 8,50$  ГПа, модуль сдвига  $G_{12} = 5,69$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu_{12} = 0,2$ , прочность при продольном растяжении  $X_t = 1340$  МПа, прочность при продольном сжатии  $X_c = 492$  МПа, прочность при поперечном растяжении  $Y_t = 40$  МПа, прочность при поперечном сжатии  $Y_c = 192$  МПа. Аналогично в расчетах для каждого слоя оболочки использовали одну точку и схему полного интегрирования.

Для описания поведения обоих типов композитных труб выбрали модель материала MAT54 в программном обеспечении LS-DYNA. Для получения функции прогрессирующего разрушения использовали критерий разрушения Чанга—Чанга [26], определяющий разрушение при растяжении в продольном направлении

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 - 1 \geq 0, \quad E_1 = E_2 = G_{12} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0, \quad (1)$$

разрушение при сжатии в продольном направлении

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1 \geq 0, \quad E_1 = \nu_{12} = \nu_{21} = 0, \quad (2)$$

разрушение при растяжении в поперечном направлении

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 - 1 \geq 0, \quad (3)$$

$$E_2 = G_{12} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0,$$

разрушение при сжатии в поперечном направлении

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S}\right)^2 + \frac{\sigma_{22}}{Y_c} \left(\frac{Y_c^2}{4S^2} - 1\right) + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 - 1 \geq 0, \quad E_2 = G_{12} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0. \quad (4)$$

Нижние индексы 1 и 2 в этих соотношениях обозначают продольное и поперечное направления соответственно. Коэффициент  $\beta$  в уравнении (1) задали равным нулю, а влияние сдвигового напряжения на разрушение при растяжении не учитывали. При выполнении соответствующего критерия разрушения некоторые модули Юнга и коэффициенты Пуассона приравняли к нулю (см. формулы (1)—(4)). Кроме того, после выполнения критерия Чанга—Чанга значение соответствующего напряжения сохраняли постоянным до тех пор, пока не достигали значения разрушающей деформации, предусмотренной в инструменте MAT54. После выполнения в конечном элементе всех четырех критериев разрушения, его исключали из рассмотрения в конечно-элементной модели. Значения разрушающих деформаций в инструменте MAT54 использовали для замедления разрушения конечного элемента, которое нельзя определить экспериментально. После выполнения нескольких пробных попыток с целью реализовать смоделированное поведение разрушения, сопоставимое с экспериментальным, определили значения разрушающих деформаций для плетеной композитной трубы (DFAILT = 0,38, DFAILC = -0,38, DFAILM = 0,37 и DFAILS = 0,32) и трубы из препрега (DFAILT = 0,30, DFAILC = -0,30, DFAILM = 0,25 и DFAILS = 0,22).

Поскольку плетеная композитная труба имела два слоя углеродной ткани, а труба из препрега — 12 слоев, в ходе удара было весьма возможно расслоение между последовательно уложенными слоями. Для учета такой ситуации между двумя последовательными слоями по толщине оболочки использовали условие связанного контакта

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1, \quad (5)$$

где NFLS и SFLS — значения прочности при растяжении и сдвиге между слоями соответственно. Для обоих типов композитных материалов выбрали значения NFLS и SFLS, равные 8,8 и 54,0 МПа соответственно, взятые из [24]. При выполнении условия (5) поверхность раздела слоев разделяется, в противном случае останется связанной.

### 3. Результаты и обсуждение

Для определения ускорения как функции времени в ходе ударного испытания на копре установили акселерометр. На рис. 4 показана такая зависимость для одного образца. На кривой заметны высокий первый пик и низкий второй. Поскольку явного отскока копра не наблюдали, вторым пиком пренебрегли и для расчета поглощенной энергии удара использова-

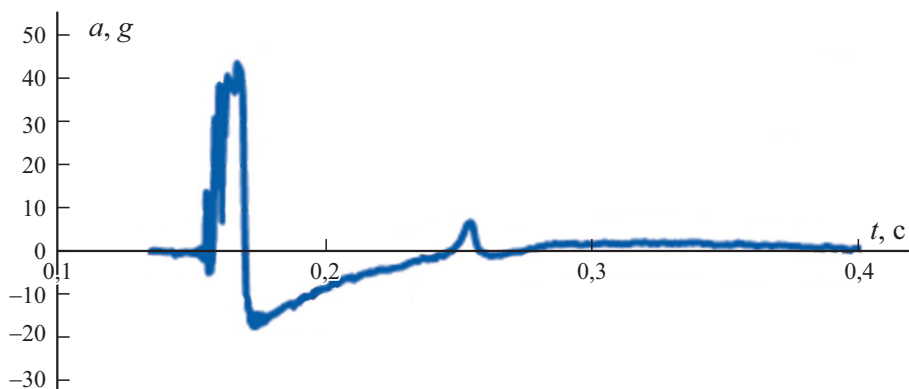


Рис. 4. Зависимость ускорения  $a$  (в  $g$ ) от времени  $t$  при ударном испытании.

ли только первый пик. По ускорению и массе копра определили силу удара  $F$ . Поглощенную энергию удара  $E_a$  вычислили как

$$E_a = \int_0^d F(\delta) d\delta, \quad (6)$$

где  $\delta$  и  $d$  — текущее и конечное значения перемещения смятия соответственно, определяемые путем двойного интегрирования зависимости ускорения от времени. Полученное конечное значение перемещения смятия очень близко к измеренному конечному местоположению копра. Удельное энергопоглощение (УЭП) вычислили, используя значения поглощенной энергии  $E_a$  и массы  $m$  сминаемого материала. Кроме того, среднюю силу удара  $F_{\text{avg}}$  определили как отношение  $E_a / d$ . Следовательно, эффективность силы смятия (ЭСМ) можно определить как отношение  $F_{\text{avg}}$  к максимальной силе удара  $F_{\text{max}}$ . Помимо УЭП большее значение ЭСМ может свидетельствовать о большей ударопрочности композитных труб.

Экспериментальные зависимости силы удара  $F$  и перемещения смятия  $\delta$  труб трех образцов плетеного композита и препрега при двух разных радиусах скругления заглушки показаны на рис. 5 и 6. Для сравнения представлена и расчетная кривая, полученная МКЭ. Некоторые результаты расчета, включая поглощенную энергию удара, УЭП и ЭСМ, приведены в таблице. Многие факторы способны повлиять на результаты моделирования, например, плотность конечно-элементной сетки и значения разрушающих деформаций, задаваемые в MAT54. Эти факторы исследовали и выбрали те, с которыми возможно получить характеристики смятия, совместимые с экспериментальными. Экспериментальные кривые на рис. 5—*a* и 6—*a* для труб с заглушкой радиусом скругления 1,6 мм демонстрируют большую начальную силу удара, отсутствующую у труб с заглушкой радиусом скругления 3,0 мм (см. рис. 5—*б* и 6—*б*). Эти данные свидетельствуют о влиянии радиуса скругления заглушки. Видно, что флуктуации силы удара незначительны. Значение средней силы удара



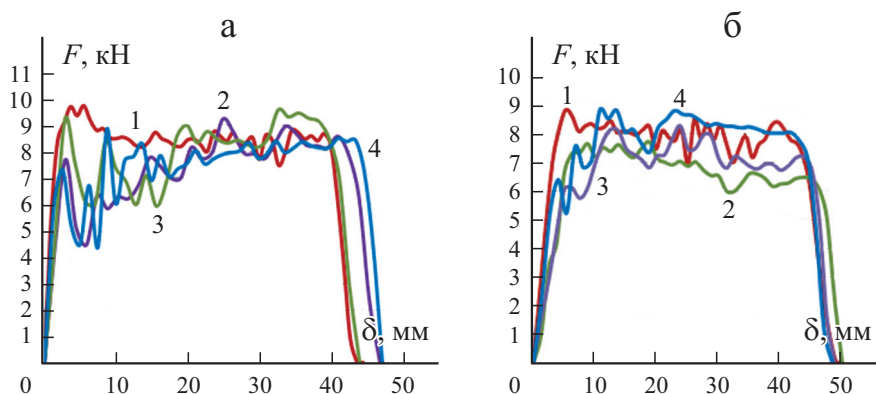


Рис. 5. Зависимость ударная нагрузка—перемещение смятия  $F — \delta$  плетеных труб с заглушкой с радиусом скругления 1,6 (а) и 3,0 мм (б): 1 — расчет МКЭ (1); 2, 3, 4 — эксперимент, образцы 1, 2, 3 соответственно.

Результаты ударных испытаний

Композит	Радиус скругления, мм	Образец	$d$ , мм	Поглощенная энергия, Дж	УЭП, Дж/Г	$F_{avg}$ , кН	$F_{max}$ , кН	ЭСМ
Плетеная ткань	1,6	1	47,3	335,7	29,7	7,42	9,26	0,80
		2	47,9	340,9	31,2	7,88	9,59	0,82
		3	46,8	349,8	30,6	7,56	8,88	0,85
		Среднее	47,4	342,2	30,5	7,62	9,24	0,82
		МКЭ	45,9 (-3,2%)	370,1 (8,2%)	31,9 (4,6%)	8,32 (9,2%)	9,85 (6,6%)	0,84 (2,4%)
	3,0	1	50,1	339,3	27,9	6,46	8,30	0,77
		2	49,1	330,0	27,5	6,74	8,29	0,81
		3	48,7	347,8	29,2	7,43	8,27	0,89
		Среднее	49,3	339,0	28,2	6,81	8,29	0,78
		МКЭ	49,4 (0,2%)	360,6 (6,4%)	29,9 (6,0%)	7,74 (13,7%)	8,98 (8,3%)	0,85 (9,0%)
Препрег	1,6	1	53,8	341,7	25,0	6,48	8,13	0,76
		2	53,1	327,7	24,4	6,42	7,85	0,75
		3	52,5	324,8	24,1	6,40	7,82	0,75
		Среднее	53,1	331,4	24,5	6,43	7,93	0,75
		МКЭ	51,7 (-2,6%)	366,8 (10,7%)	26,9 (9,8%)	7,41 (15,2%)	9,20 (16,0%)	0,80 (6,7%)
	3,0	1	66,0	340,9	19,5	5,52	6,65	0,83
		2	64,1	345,9	23,0	5,39	6,72	0,79
		3	64,0	328,2	22,2	5,32	6,61	0,79
		Среднее	64,7	338,3	21,6	5,41	6,66	0,79
		МКЭ	65,4 (1,1%)	354,6 (4,8%)	23,0 (6,5%)	6,41 (18,5%)	7,78 (16,8%)	0,82 (3,8%)

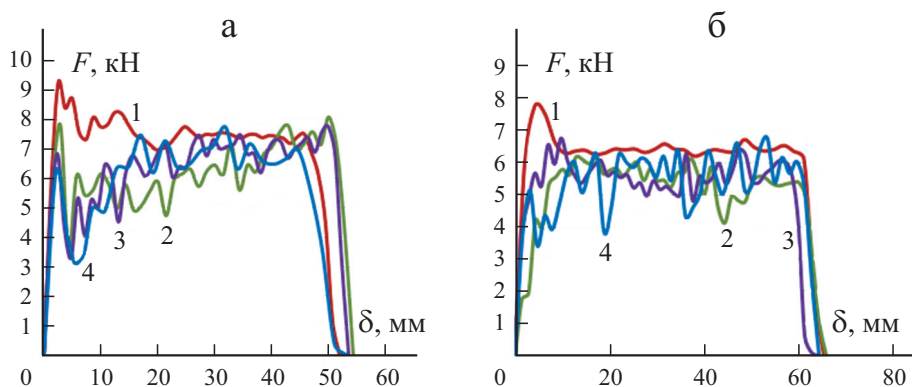


Рис. 6. Зависимость ударная нагрузка—перемещение смятия  $F$ — $\delta$  труб из препрега. Обозначения те же, что на рис. 5

довольно близко к максимальному, а значение ЭСМ изменяется от 0,75 до 0,82 (см. таблицу).

Расчетная и экспериментальные кривые ударная нагрузка—перемещение смятия  $F$ — $\delta$  плетеных композитных труб довольно близки (см. рис. 5). Как следует из данных таблицы, различие между результатами расчета МКЭ и средними экспериментальными значениями конечного перемещения смятия, поглощенной энергии удара, УЭП и максимальной силы менее 8,3%. Только экспериментальные значения средней силы удара отличались на 9,2 и 13,7% от расчетных для обоих радиусов скругления заглушки. Для труб из препрега эти различия 15 и 18,5% соответственно. Однако экспериментальные значения конечного перемещения смятия, поглощенной энергии и УЭП для труб из препрега показали хорошее соответствие с расчетными. Таким образом, анализ МКЭ, выполненный в настоящей работе, надежен и может использоваться для моделирования осевого смятия композитных труб, изготовленных из ткани или препрегов волокон.

Различие двух типов композитных труб очевидно. Композитные трубы из препрега обладают меньшей ударопрочностью. Например, средние экспериментальные значения УЭП композитных труб из препрега с радиусом скругления заглушки 1,6 и 3,0 мм равны 24,5 и 21,6 Дж/г соответственно, а плетеных труб — 30,5 и 28,2 Дж/г соответственно. Таким образом, УЭП труб из препрега на ~20% меньше, чем плетеных труб. Такой результат ожидали, поскольку плетеные композитные трубы обладают идеальной структурой, а трубы из препрега имеют слабое звено — местоположение стыка в каждом слое. Учет этой особенности при расчете МКЭ продемонстрировал разный тип поведения труб при смятии. В настоящей работе местоположения стыков при анализе МКЭ такие же, как и в изготовленных композитных трубах из препрега. Задание в анализе МКЭ иного местоположения стыков приводит к другим результатам. В качестве примера на рис. 7 сопоставлены результаты для трубы из шестислойного препрега с двумя разными вариантами место-

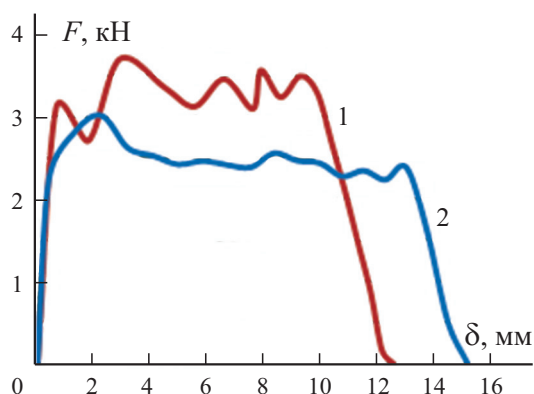


Рис. 7. Зависимость ударная нагрузка—перемещение смятия  $F$ — $\delta$  труб из препрега с разным местоположением стыка свернутых слоев препрега: случаи 1 (1) и 2 (2).

положения стыков при ударе с энергией 101 Дж и скоростью 3 м/с. В одной трубе (случай 1) равномерное распределение стыков, при котором угол между двумя соседними стыками  $60^\circ$ , в другой трубе (случай 2) — одинаковое местоположение имели стыки слоев с первого по третий и с четвертого по шестой соответственно. Видно, что зависимости ударная нагрузка—перемещение смятия совершенно разные. Значение УЭП равно 28 (случай 1) и 25 Дж/г (случай 2). Таким образом, положение стыков влияет на характеристики смятия труб из препрега. При этом их ударопрочность больше при более равномерном распределении стыков.

Из данных таблицы видно, что радиус скругления заглушки влияет на характеристики смятия трубы, а также что при меньшем значении радиуса скругления конечное перемещение смятия меньше. Это свидетельствует о меньшем количестве поврежденного материала. Кроме того, при меньшем радиусе скругления значения средней и максимальной силы удара больше, что ясно свидетельствует о более высокой УЭП. Это может быть обусловлено более полным повреждением с образованием мелких осколков, происходящим в случае малого радиуса скругления заглушки.

На рис. 8 показана морфология разрушения труб, наблюдаемая в экспериментах и смоделированная МКЭ. Эксперименты показали, что композитная труба из препрега более хрупкая, чем плетеная. Моделирование МКЭ не выявило заметного различия в хрупкости труб из плетеного композита и препрега, за исключением конечного перемещения смятия. Следует отметить образование большего количества осколков разрушенного композита при использовании заглушки с большим радиусом скругления. Из данных рис. 8 видно, что экспериментально наблюдаемое разрушение более хрупкое (с более мелкими осколками), чем смоделированное МКЭ. Расслоение поврежденного материала также наблюдали экспериментально и при моделировании МКЭ. В таблице также приведены значения ЭСМ. Однако характер их изменения не соответствовал тенденции ударопрочности ни в одном из четырех рассмотренных случаев. Например, при одинаковом радиусе скругления заглушки 3,0 мм экспериментальные значения

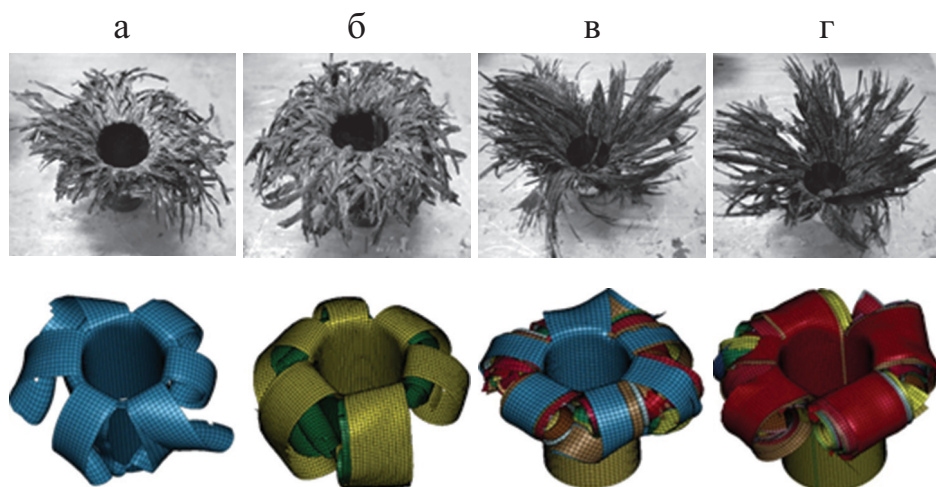


Рис. 8. Сравнение морфологии разрушения, наблюдаемой при испытании и моделировании труб из плетеного композита (а, б) и препрега (в, г) с заглушкой с радиусом скругления 1,6 (а, в) и 3,0 мм (б, г).

ЭСМ труб из плетеного композита и препрега 0,78 и 0,79 соответственно, а экспериментальные значения УЭП уменьшались от 28,2 до 21,6 Дж/г соответственно. Поэтому хотя близкие значения средней и максимальной силы удара желательны для лучшей ударопрочности, не следует использовать величину ЭСМ для ее представления.

### Заключение

Экспериментально и численно исследовано смятие двух типов композитных труб с заглушкой при осевом ударе. Один тип композитных труб изготовлен из ткани углеродных волокон методом литьевого прессования, а другой — из препрега углеродных волокон методом укладки. Также учли влияние радиуса скругления заглушки. Поведение труб при смятии моделировали МКЭ, включая функцию прогрессирующего разрушения и возможность расслоения. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными показало, что использование МКЭ обеспечивает хорошее предсказание конечного перемещения смятия, УЭП, максимальной силы. Анализ МКЭ позволил выявить разные виды смятия композитных труб. Экспериментальные средние значения УЭП композитных труб из препрега с заглушкой с радиусом скругления 1,6 и 3,0 мм 24,5 и 21,6 Дж/г соответственно, а плетеных труб с такой же заглушкой — 30,5 и 28,2 Дж/г соответственно. Эти результаты свидетельствуют о том, что УЭП труб из препрега на ~20% меньше, чем труб из плетеного композита, что можно объяснить наличием стыков слоев препрега. Результаты МКЭ также показали, что разные местоположения стыков могут обусловить разные виды

смятия. Кроме того, заглушка с малым радиусом скругления приводит к образованию более мелких осколков разрушенного материала при ударе.

*Благодарность.* Благодарим за финансовую поддержку Министерство науки и технологий Тайваня посредством гранта MOST 106-2221-E-224-021.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bisagni C.* Experimental investigation of the collapse modes and energy absorption characteristics of composite tubes // *Int. J. Crashworthiness.* — 2009. — Vol. 14. — P. 365—378.
2. *Reuter C., Sauerland K. H., and Tröster T.* Experimental and numerical crushing analysis of circular CFRP tubes under axial impact loading // *Compos. Struct.* — 2017. — Vol. 154. — P. 33—44.
3. *White M. D., Jones N., and Abramowicz W.* A theoretical analysis for the quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections // *Int. J. Mech. Sci.* — 1999. — Vol. 41. — P. 209—233.
4. *Abramowicz W. and Jones N.* Dynamic progressive buckling of circular and square tubes // *Int. J. Impact Eng.* — 1986. — Vol. 4. — P. 243—270.
5. *Reuter C. and Tröster T.* Crashworthiness and numerical simulation of hybrid aluminium CFRP tubes under axial impact // *Thin Wall Struct.* — 2017. — Vol. 117. — P. 1—9.
6. *Siromani D., Henderson G., Mikita D., Mirarchi L., Park R., Smolko J., Awerbuch J., and Tan T. M.* An experimental study on the effect of failure trigger mechanisms on the energy absorption capability of CFRP tubes under axial compression // *Composites: Part A.* — 2014. — Vol. 64. — P. 25—35.
7. *Huang J. and Wang X.* Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes // *Compos. Struct.* — 2009. — Vol. 91. — P. 222—228.
8. *McGrefor C. J., Vaxiri R., Poursartip A., and Xiao X.* Simulation of progressive damage development in braided composite tubes under axial compression // *Composites: Part A.* — 2007. — Vol. 38. — P. 2247—2259.
9. *Liu Q., Xing H., Ju Y., Qu Z., and Li Q.* Quasi-static axial crushing and transverse bending of double hat shaped CFRP tubes // *Compos. Struct.* — 2014. — Vol. 117. — P. 1—11.
10. *McGrefor C. J., Vaxiri R., and Xiao X.* Finite element modelling of the progressive crushing of braided composite tubes under axial impact // *Int. J. Impact Eng.* — 2010. — Vol. 37. — P. 662—672.
11. *Hou T., Pearce G. M. K., Prusty B. G., Kelly D. W., and Thomson R. S.* Pressurised composite tubes as variable load energy absorbers // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 120. — P. 346—357.
12. *Liu Q., Qu Z., Mo Z., Li Q., and Qu D.* Experimental investigation into dynamic axial impact responses of double hat shaped CFRP tubes // *Composites: Part B.* — 2015. — Vol. 79. — P. 494—504.
13. *Ochelski S. and Gotowicki P.* Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites // *Compos. Struct.* — 2009. — Vol. 87. — P. 215—224.
14. *Boria S., Scattina A., and Belingardi G.* Axial energy absorption of CFRP truncated cones // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 130. — P. 18—28.
15. *Shokrieh M. M., Tozandehjani H., and Omid M. J.* Effect of fiber orientation and cross section of composite tubes on their energy absorption ability in axial dynamic loading // *Mech. Compos. Mater.* — 2009. — Vol. 45. — P. 567—576.

16. *Mou H. L., Xie J., Su X., and Feng Z. Y.* Crashworthiness experiment and simulation analysis of composite thin-walled circular tubes under axial crushing // *Mech. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 55. — P. 121—134.
17. *Siromani D., Awerbuch J., and Tan T. M.* Finite element modeling of the crushing behavior of thin-walled CFRP tubes under axial compression // *Composites: Part B.* — 2014. — Vol. 64. — P. 50—58.
18. *Tong Y. and Xu Y.* Improvement of crash energy absorption of 2D braided composite tubes through an innovative chamfer external triggers // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — Vol. 111. — P. 11—20.
19. *Siromani D., Awerbuch J., and Tan T. M.* Finite element modeling of the crushing behavior of thin-walled CFRP tubes under axial compression // *Composites: Part B.* — 2014. — Vol. 64. — P. 50—58.
20. *Reuter C., Sauerlan K. H., and Troster T.* Experimental and numerical crushing analysis of circular CFRP tubes under axial impact loading // *Compos. Struct.* — 2017. — Vol. 174. — P. 33—44.
21. *Sliseris J., Yan L., and Kasal B.* Numerical simulation and experimental verification of hollow and foam-filled flax-fabric-reinforced epoxy tubular energy absorbers subjected to crushing // *Mech. Compos. Mater.* — 2017. — Vol. 53. — P. 487—496.
22. *Paruka P., Siswanto W. A., Maleque M. A., and Shah M. K. M.* Crashworthy capacity of a hybridized epoxy-glass fiber aluminum columnar tube using repeated axial resistive force // *J. Mech. Sci. Technol.* — 2015. — Vol. 29. — P. 1941—1953.
23. *Xiao X., Botkin M. E., and Johnson N. L.* Axial crush simulation of braided carbon tubes using MAT 58 in LS-DYNA // *Thin Wall. Struct.* — 2009. — Vol. 47. — P. 740—749.
24. *Hwang S. F. and Chang Y. C.* Axial crushing behavior of braided carbon/polyurethane composite tubes // *Appl. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 26. — P. 1281—1297.
25. *Hwang S. F. and Liu H. T.* Prediction of elastic constants of carbon fabric/polyurethane composites // *Solid State Phenom.* — 2017. — Vol. 258. — P. 233—236.
26. *Chang F. K. and Chang K. Y.* A progressive damage model for laminated composites containing stress concentration // *J. Compos. Mater.* — 1987. — Vol. 21. — P. 834—855.

Поступила в редакцию 02.03.2020

Окончательный вариант поступил 23.02.2021

Received March 2, 2020 (Feb. 23, 2021)

---