

*Р. Гюнеш<sup>а</sup>\*, Дж. Аль-Грайшави<sup>б</sup>*

*<sup>а</sup>Department of Mechanical Engineering, Erciyes University, Kayseri 38039, Turkey*

*<sup>б</sup>Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri 38039, Turkey*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛСТЫХ И ТОНКИХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ<sup>1</sup>**

*R. Gunes\* and J. Al-Hraishawi*

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO THE LOW-VELOCITY IMPACT BEHAVIOR OF THICK AND THIN LAMINATED COMPOSITES**

**Keywords:** low-velocity impact, VARI method, polymer matrix composite, thick and thin laminated composites

The low-velocity impact behavior of thick and thin unidirectional E-glass fiber-reinforced laminated composite plates with three different stacking sequences subjected to three different impact energies have been investigated. The test specimens were produced by the Vacuum Assisted Resin Injection (VARI) method in a laboratory environment. The thick specimens contained 50 layers of unidirectional E-glass fibers and the thin ones — 16 layers of unidirectional E-glass fibers. The low-velocity impact tests were carried out using a CEAST Fractovis drop-weight impact test device. The contact force–time and energy–time graphics were plotted and the experimental results were interpreted in detail.

**Ключевые слова:** удар низкоскоростной, метод инфузии вакуумной, композит с матрицей полимерной, композиты слоистые толстые и тонкие

Исследованы низкоскоростные ударные характеристики толстых и тонких композитных пластин, однонаправленно армированных E-стекловолокнами с тремя последовательностями укладки, подвергнутых воздействию трех уровней энергии удара. Образ-

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [recepg@erciyes.edu.tr](mailto:recepg@erciyes.edu.tr)  
Corresponding author: [recepg@erciyes.edu.tr](mailto:recepg@erciyes.edu.tr)

<sup>1</sup>Перевод с англ.

цы для испытаний изготовлены методом вакуумной инфузии в лабораторных условиях. Толстые образцы имели 50 слоев из однонаправленных E-стекловолокон, а тонкие — 16 слоев. Испытания на низкоскоростной удар проведены на установке CEAST Fcastovis с падающим грузом. Построены экспериментальные временные зависимости контактной силы и энергии удара и полученные результаты подробно проанализированы.

## Введение

Большое разнообразие и превосходные свойства композитов с полимерной матрицей (КПМ), а также возможность изготовления толстых и сложных инженерных конструкций с использованием этих материалов привели к неуклонному росту применения КПМ, особенно в приложениях с особыми требованиями по технике безопасности. Эти материалы, сначала использованные для снижения конструкционной массы и повышения коррозионной стойкости, впоследствии получили широкое распространение в крупных толстостенных конструкциях, часто сложной формы, особенно в авиации/обороне, транспорте (автомобильном, морском и воздушном), мостах, строительстве, электро- и ядерной энергетике, канализационных водостоках, химических заводах и оффшорных приложениях. Толстые композиты также могут заменить металлические конструкции, особенно в ударных и баллистических приложениях. Однако по сравнению с традиционными металлическими конструкциями слоистые композиты при воздействии ударной нагрузки могут подвергаться разным механизмам повреждения, включая растрескивание матрицы, разрывы волокон и расслоения. Ударные нагрузки обуславливают возникновение в композитных конструкциях повреждений, едва заметных при визуальном осмотре. Общеизвестно, что такие внутренние ударные повреждения могут значительно снизить конструкционные характеристики и срок службы слоистых композитов. Повышенная сила удара значительно увеличивает площадь расслоения и существенно снижает остаточную прочность слоистого композита при сжатии. Предыдущие исследования показали, что обусловленная ударом остаточная прочность при сжатии и распространение расслоения нечувствительны к толщине пластины в диапазоне от 5 до 25 мм. Это обусловлено тем, что изгибная деформация по толщине толстых слоистых композитов [1] пренебрежимо мала по сравнению со сдвиговой. Иными словами, толстый слоистый композит ведет себя как полубесконечное тело. Ударные повреждения, возникающие в таких конструкциях, носят локальный характер в виде разрыва волокон вокруг места удара [2].

Проведены многочисленные экспериментальные и численные исследования низкоскоростного ударного поведения тонких слоистых композитов [3—13], а также слоистых композитов с добавками наночастиц (углеродных нанотрубок, наноглины) [14, 15]. Однако опубликовано мало

исследований ударного поведения толстых композитных конструкций. В [16] представлены аналитические уравнения для предсказания проникновения и перфорации толстых слоистых композитов при ударе с разной скоростью в нормальном направлении снарядами, имеющими носовую часть разной формы (усеченную, коническую, плоскую, оживальную и полусферическую). Получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. В [17] изучали ударную реакцию толстых композитных пластин, подвергнутых предварительному одноосному растяжению. Путем измерения определили влияние предварительной нагрузки на области расслоения. В [18] представили подход к моделированию экспериментально испытанных толстых панелей из углепластиков, подвергающихся низкоскоростным ударам. Полученные результаты обсудили с точки зрения силы, энергии, перемещения, деформации и расслоения. В [19] представили подробное исследование механизмов повреждения и разрушения толстых слоистых композитов, подвергающихся низкоскоростным ударам. Обсудили характеристики распределения расслоения в толстых слоистых композитах, объединив экспериментальные результаты и численное моделирование. В [20] оценивали влияние толщины слоистого композита на инициирование и распространение повреждений при низкоскоростных ударах и на остаточную прочность после них. Численные результаты показали близкое соответствие с экспериментальными в рассмотренном диапазоне толщин слоистого композита. В [21] экспериментально изучали низкоскоростное ударное поведение сандвич-композитов, армированных базальтовыми волокнами, при разной энергии удара и толщине лицевого слоя. Установлено, что увеличение толщины лицевого слоя уменьшает остаточную деформацию и увеличивает пиковую нагрузку. В [22] представили всесторонний обзор нелинейного механического поведения КППМ.

Из представленного обзора литературы следует, что необходимы новые исследования для лучшего понимания низкоскоростного ударного поведения толстых слоистых композитов. Поэтому в настоящей работе экспериментально исследовано низкоскоростное ударное поведение тонких и толстых пластин из слоистых композитов с целью лучшего понимания влияния толщины, последовательности укладки и величины энергии на их ударное поведение.

Изготовили образцы толстых и тонких слоистых композитов с укладками  $[0^\circ/90^\circ]$ ,  $[30^\circ/60^\circ]$  и  $[-45^\circ/+45^\circ]$ . Тонкие композитные пластины на основе E-стекловолокон и эпоксидной смолы изготовили толщиной  $\sim 8$  мм из 16 однонаправленных слоев стекловолокон, а толстые — толщиной  $\sim 25$  мм из 50 однонаправленных слоев стекловолокон. Все образцы подвергли экспериментальному воздействию низкоскоростных ударных нагрузок с энергией 20, 40 и 60 Дж. Полученные результаты представили в терминах контактной силы и кинетической энергии, а также выявили и детально изучили повреждения каждого образца.

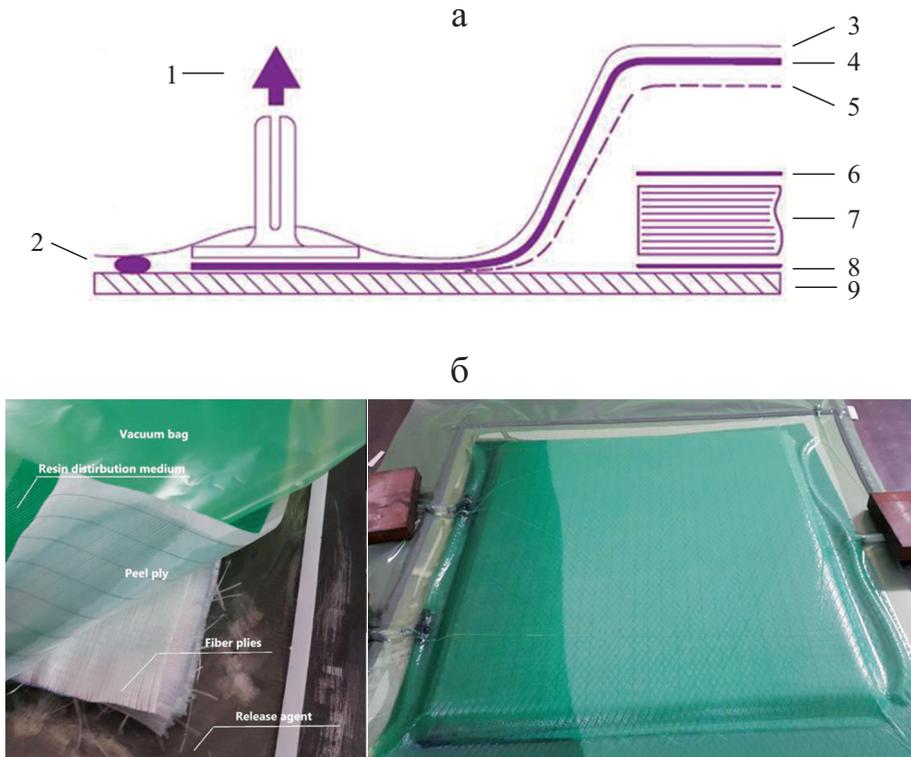


Рис. 1. Изготовление слоистых композитов методом вакуумной инфузии: схема метода (а) и его экспериментальная установка (б): 1 — вакуумный насос; 2 — вакуумная герметизирующая лента; 3 — вакуумная пленка; 4 — поглотитель; 5 — перфорированная пленка; 6 — разделительный слой; 7 — слоистый композит; 8 — термоплита.

## 1. Экспериментальный метод

**1.1. Изготовление слоистых композитов для экспериментов.** Все слоистые композиты изготовили из однонаправленных E-стекловолокон плотностью  $600 \text{ г/м}^2$  в качестве арматуры и матрицы из смеси смолы MGS LH160 и отвердителя MGS LH160, смешанных в соотношении 3:1.

Образцы изготовили методом вакуумной инфузии смолы (рис. 1). После заполнения вакуумной среды смолой ее отверждали не менее 2 ч при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  с использованием противодействия под алюминиевым столом. Затем со слоистого композита удалили разделительную пленку на нижней поверхности и вакуумный нейлон, инфузионную сетку и отслаивающийся слой. Таким образом изготовили тонкие и толстые слоистые композиты. Образцы размером  $100 \times 100 \text{ мм}$  для испытаний на удар вырезали с помощью специального дискового резака.

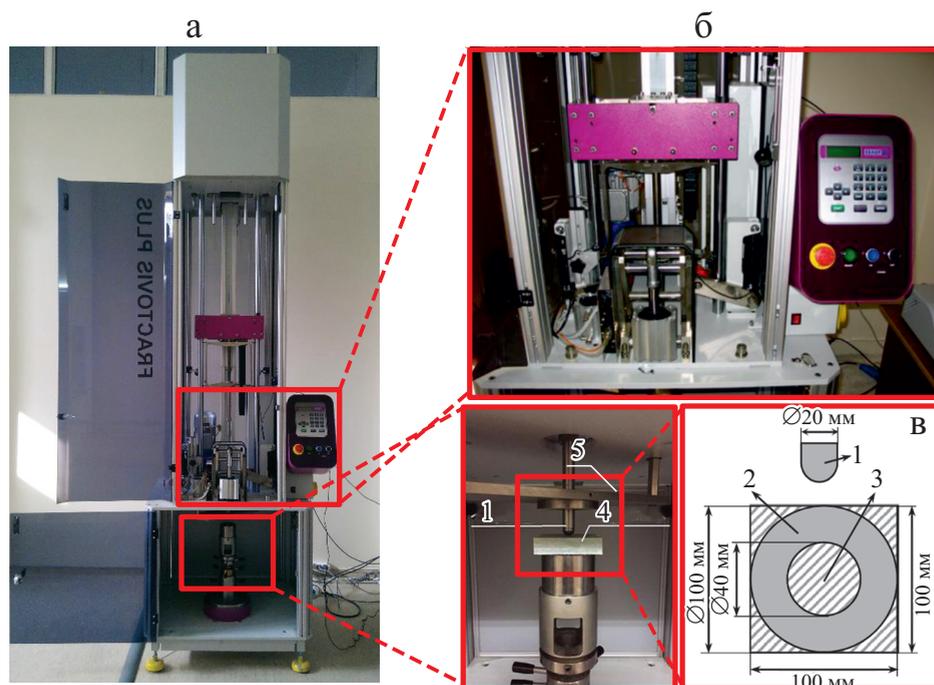


Рис. 2. Установка для испытаний падающим грузом (а), система защиты от отскока (б) и устройство для соединения образцов (в): 1 — ударник; 2 — фиксатор; 3 — область удара; 4 — образец; 5 — пневмонический захват.

Слоистые композиты во избежание загрязнения изготовили на очищенных от масла и грязи поверхностях в беспыльной среде для исключения влияния загрязнения на качество и характеристики композита.

**1.2. Установка для ударных испытаний и их параметры.** Испытания на низкоскоростной удар выполнили на установке CEAST Fractovis Plus (рис. 2—а) с системой защиты от отскока (рис. 2—б) во избежание повторных ударов в ходе испытаний. Ударник полусферической формы диаметром 20 мм соединен с датчиком силы 40 кН, имевшими общую массу 5,045 кг. Образцы для испытаний удерживала пневматическая система с круглым держателем с внутренним диаметром 40 мм (рис. 2—в). Результаты испытаний регистрировала система сбора данных (DAS 16000), а зависящее от времени изменение контактной силы  $F(t)$  — датчик силы с программой визуального воздействия. Таким образом, на выходе испытательного устройства с падающим грузом действовала сила  $F(t)$ , прикладываемая к ударному элементу через равные промежутки времени, пропорциональная частоте выборки данных. Зависящие от времени скорость  $v(t)$ , перемещение  $\delta(t)$  и поглощенную энергию  $E_a(t)$  рассчитывали по контактной силе  $F(t)$  согласно кинематическим соотношениям [23]

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt, \quad (1)$$

$$\delta(t) = v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt dt, \quad (2)$$

$$E_a(t) = \frac{m(v_i^2 - v(t)^2)}{2} + mg\delta(t), \quad (3)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $m$  — масса ударника;  $v_i$  — скорость ударника перед ударом по образцу.

Скорость удара достигала от 0,75 до 4,6 м/с за счет свободного сброса траверсы с высоты 30—1100 мм, а общая масса ударника могла быть увеличена до 70 кг. Энергию удара можно было изменять в диапазоне от 0,6 до 755 Дж. При использовании дополнительной энергетической системы с подпружиненной скоростной системой энергию удара можно было увеличить до 1800 Дж. В каждом испытании ударный элемент попадал в центр композитных образцов (центральный удар).

Испытание начинали, отпуская ударник с заданной высоты. Как только ударник достигал образца, датчик времени посылал сигнал на два триггера времени. Скорость ударника вычисляли по времени его прохождения между триггерами. Предполагали, что энергия ударника передается композитному образцу без учета потерь тепла и энергии при ударе.

Эксперименты по низкоскоростному удару провели при комнатной температуре. Масса ударника, равная 5,045 кг, не изменялась в ходе экспериментов. Диаметр носовой части ударника 20 мм. Использовали квадратные образцы размером 100×100 мм, толщиной 25 и 8 мм. Образцы с укладками  $[0^\circ/90^\circ]$ ,  $[30^\circ/60^\circ]$ ,  $[-45^\circ/+45^\circ]$  подвергали воздействию энергии удара 20, 40 и 60 Дж.

## 2. Результаты и обсуждение

Влияние толщины, последовательности укладки слоев и разной энергии удара на ударное поведение слоистых композитов исследовали экспериментально. Для достоверности получаемых результатов ударные испытания каждого типа слоистого композита повторяли трижды. Результаты оказались весьма схожими. Ударный отклик образцов анализировали с помощью временных зависимостей контактной силы и энергии удара и фотографий повреждений. Силу сопротивления, оказываемую образцом на головку ударника, учитывали как функцию времени и сохраняли для последующего отображения и оценки. Для каждого образца регистрировали контактную силу в несколько последовательных моментов времени. Историю изменения скорости ударника вычисляли путем интегрирования истории силы (деленной на массу ударника) и суммирования с начальной скоростью удара. Соответствующую историю перемещения ударника вычисляли путем интегрирования истории скорости от времени. На основе историй перемещения и скорости ударника вычисляли историю энергии,

Экспериментальные результаты для тонких и толстых композитов с разной укладкой при ударе с разной энергией

Образец	Энергия удара, Дж	Поглощенная энергия, Дж	Максимальная контактная сила, кН	Время контакта, мс
$[0^\circ/90^\circ]_{16}$	20	12,655	13,91	4,031
$[0^\circ/90^\circ]_{16}$	40	21,558	16,986	3,937
$[0^\circ/90^\circ]_{16}$	60	29,805	22,153	4
$[0^\circ/90^\circ]_{50}$	20	11,67	24,016	2,125
$[0^\circ/90^\circ]_{50}$	40	22,927	33,705	2,562
$[0^\circ/90^\circ]_{50}$	60	31,707	40,839	1,762
$[30^\circ/60^\circ]_{16}$	20	13,551	14,4	3,987
$[30^\circ/60^\circ]_{16}$	40	22,302	17,634	3,987
$[30^\circ/60^\circ]_{16}$	60	26,677	23,17	3,762
$[30^\circ/60^\circ]_{50}$	20	11,466	24,567	2,512
$[30^\circ/60^\circ]_{50}$	40	23,261	34,717	2,262
$[30^\circ/60^\circ]_{50}$	60	31,725	41,34	1,987
$[-45^\circ/+45^\circ]_{16}$	20	10,981	13,24	4,487
$[-45^\circ/+45^\circ]_{16}$	40	22,531	17,499	3,987
$[-45^\circ/+45^\circ]_{16}$	60	28,857	22,523	3,987
$[-45^\circ/+45^\circ]_{50}$	20	10,425	25,579	2
$[-45^\circ/+45^\circ]_{50}$	40	20,65	36,706	2
$[-45^\circ/+45^\circ]_{50}$	60	30,437	41,34	1,88

характеризующую историю передачи энергии от ударника к композиту. Экспериментальные данные приведены в таблице.

**2.1. Влияние толщины.** История силы низкоскоростного удара предоставляет важную информацию о распространении и инициировании повреждения. Известно, что резкое падение нагрузки в истории силы удара связано с уменьшением жесткости слоистых композитов в силу возникновения расслоения [24, 25].

Влияние толщины на ударный отклик слоистых композитов исследовали, сопоставляя динамику ударной нагрузки образцов разной толщины, подвергнутых энергии удара 20, 40 и 60 Дж. Контактная сила и ее максимальное значение — важные параметры, характеризующие материал. В данном контексте знание контактной силы и ее максимального значения в отношении толщины слоя с известной в нем ориентацией армирующих волокон полезно с точки зрения проектирования и анализа.

Для лучшего наблюдения за повреждением композитов, армированных стекловолокнами, исследовали светопропускание [26]. Поскольку слоистые композиты, использованные в настоящем исследовании, относительно толстые, после удара места повреждений фотографировали при достаточном освещении; затем изображения масштабировали и импортировали в

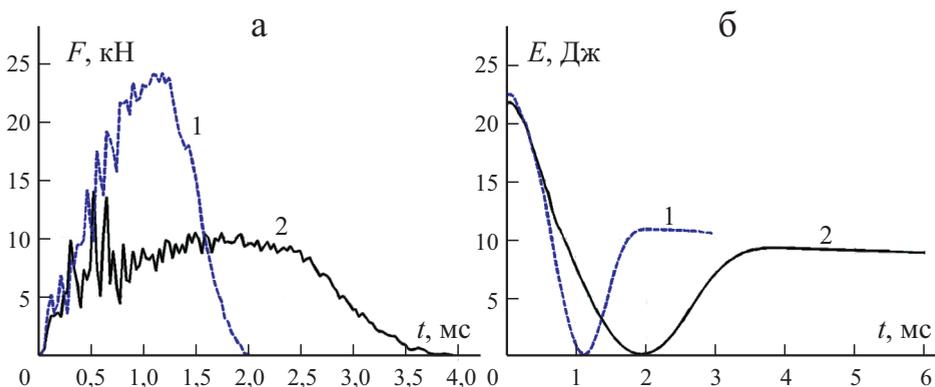


Рис. 3. Временные зависимости контактной силы  $F—t$  (а) и кинетической энергии  $E—t$  (б) толстых (1) и тонких (2) композитов с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$  при ударе энергией 20 Дж.

специальную графическую программу. После определения с помощью этой программы периметра области повреждения вычисляли ее площадь и оценивали картины повреждения на передней и задней поверхностях этой области.

Влияние толщины образца на ударный отклик слоистых композитов, подвергнутых разной энергии удара, было одинаковым. Поэтому подробно обсудим результаты только при энергии удара 20 Дж.

На рис. 3 приведены временные зависимости контактной силы  $F—t$  и кинетической энергии  $E—t$  тонких и толстых композитов с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$ , подвергнутых энергии удара 20 Дж. У тонких образцов пиковое значение контактной силы 13,91 кН и время контакта 0,531 мс, а у толстых — 24,016 кН и 1,187 мс соответственно; различие пиковых значений 42,08%. Поглощенная энергия в тонком и толстом образцах равна 12,655 и 11,67 Дж соответственно. В силу большей гибкости тонкий композит поглотил на 7,78% больше энергии, чем толстый. На рис. 4 показаны картины повреждений тонкого и толстого образцов. Площадь повреждения на передней и задней поверхностях тонкого образца 321,82 и 793,59 мм<sup>2</sup> соответственно. Площадь повреждения на передней поверхности толсто-

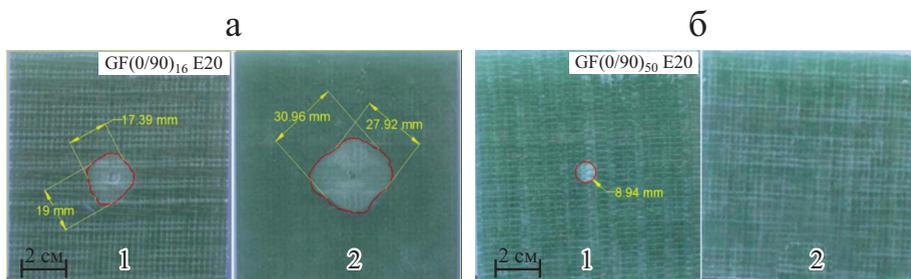


Рис. 4. Фотографии повреждений на передней (1) и задней (2) поверхностях тонких (а) и толстых (б) образцов композита с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$  после удара энергией 20 Дж.

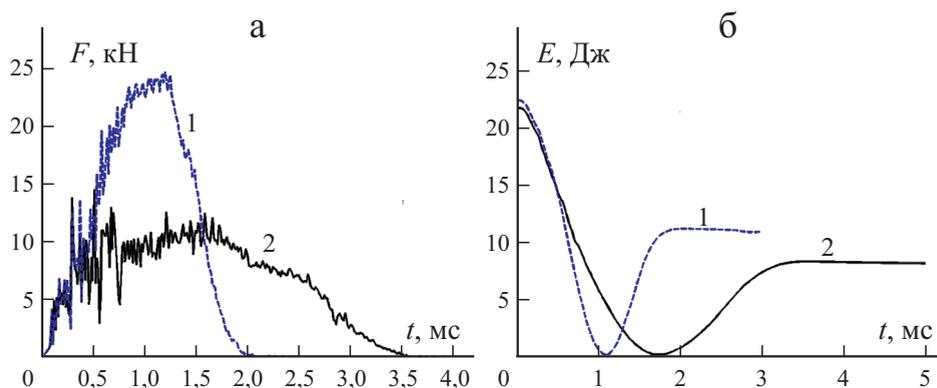


Рис. 5. Временные зависимости контактной силы  $F-t$  (а) и кинетической энергии  $E-t$  (б) толстых (1) и тонких (2) композитов с укладкой  $[30^\circ/60^\circ]$  при ударе энергией 20 Дж.

го образца  $62,78 \text{ мм}^2$ ; на задней поверхности никаких повреждений не обнаружено.

На рис. 5 приведены временные зависимости контактной силы  $F-t$  и кинетической энергии  $E-t$  тонких и толстых композитов с укладкой  $[30^\circ/60^\circ]$ , подвергнутых энергии удара 20 Дж. Пиковое значение контактной силы 14,4 кН и время контакта 0,5 мс у тонкого образца, а у толстого — 24,567 кН и 1,187 мс соответственно; различие пиковых значений 41,38%. Поглощенная энергия в тонком и толстом образцах 13,551 и 11,466 Дж соответственно. Тонкий композит поглотил на 15,38% больше энергии, чем толстый, в силу большей гибкости. На рис. 6 показаны картины повреждений тонкого и толстого образцов. Площадь повреждения на передней и задней поверхностях тонкого образца 310,06 и 1025,92  $\text{мм}^2$  соответственно. У толстого образца площадь повреждения на передней поверхности 55,8  $\text{мм}^2$ ; на задней поверхности повреждений не обнаружено.

На рис. 7 приведены временные зависимости контактной силы  $F-t$  и кинетической энергии  $E-t$  тонких и толстых композитов с укладкой  $[-45^\circ/+45^\circ]$  при энергии удара 20 Дж. У тонкого образца пиковое значение контактной силы 13,24 кН и время контакта 0,662 мс, а у толстого —

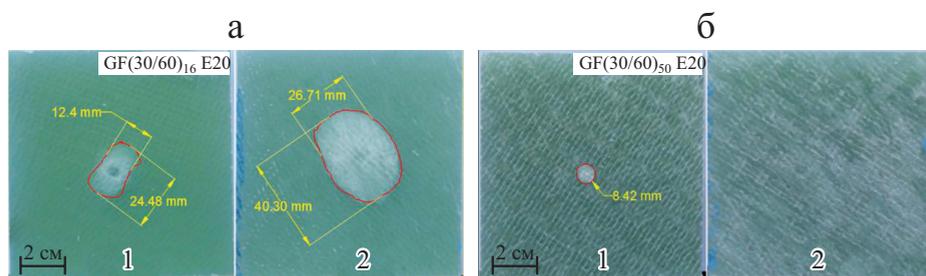


Рис. 6. Фотографии повреждений на передней (1) и задней (2) поверхностях тонких (а) и толстых (б) образцов композита с укладкой  $[30^\circ/60^\circ]$  после удара энергией 20 Дж.

25,579 кН и 0,925 мс соответственно; различие пиковых значений 48,238 %. Поглощенная энергия в тонком и толстом образцах 10,981 и 10,425 Дж соответственно. Тонкий композит поглотил на 5,063% больше энергии, чем толстый, в силу большей гибкости. На рис. 8 показаны картины повреждений тонкого и толстого образцов. Площадь повреждения на передней и задней поверхностях тонкого образца 336,48 и 888,91 мм<sup>2</sup> соответственно. Площадь повреждения на передней поверхности толстого образца 60,02 мм<sup>2</sup>; на задней поверхности повреждений не наблюдали.

Повреждения слоистых композитов при низкоскоростных ударах можно разделить на две категории: внутрислойные (повреждение волокон и растрескивание матрицы) и межслойные (расслоение) [27]. Влияние толщины слоистых композитов на их ударный отклик показано путем сравнения динамики ударных сил. Из данных рис. 7 отчетливо видно, что пиковое контактное усилие возрастает, а продолжительность контакта уменьшается с увеличением толщины слоистого композита. При этом не наблюдали никаких неожиданных падений нагрузки ни у толстых, ни у тонких образцов. Часть энергии удара теряется на тепло и колебания, а остальная играет решающую роль в развитии таких повреждений, как расслоение, разрыв волокон и растрескивание матрицы [26]. Большое поглощение энергии связано с межслойными и внутрислойными повреждениями при высоких уровнях энергии удара. У толстых образцов устойчивость к повреждениям достаточно высока, чтобы избежать любого расслоения, и большая часть энергии удара может быть поглощена упругими деформациями. Кроме того, вблизи места удара возникают локальные внутрислойные повреждения в виде разрыва волокон и смятия матрицы.

В тонких образцах повреждения обусловлены преимущественно изгибом и проявляются в большей степени на задней поверхности образцов в виде расслоений (межслойные), разрывов волокон и повреждения матрицы (внутрислойные). С увеличением энергии удара увеличивается количество повреждений. Площадь повреждения на задней поверхности образцов

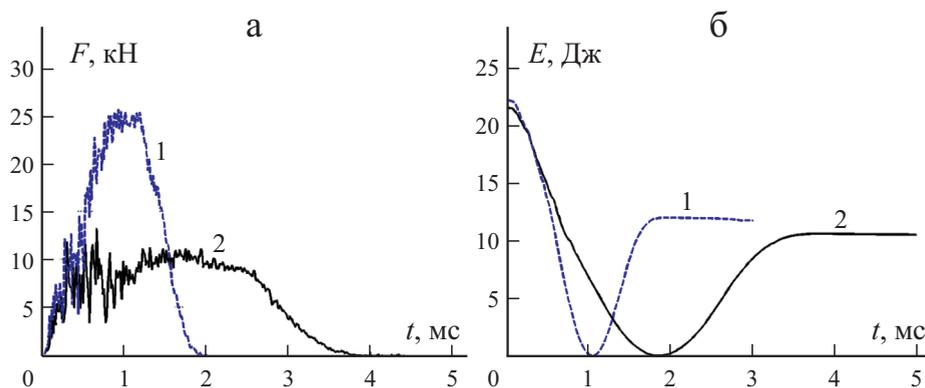


Рис. 7. Временные зависимости контактной силы  $F$  —  $t$  (а) и кинетической энергии  $E$  —  $t$  (б) толстых (1) и тонких (2) композитов с укладкой  $[-45^\circ/+45^\circ]$  при ударе энергией 20 Дж.

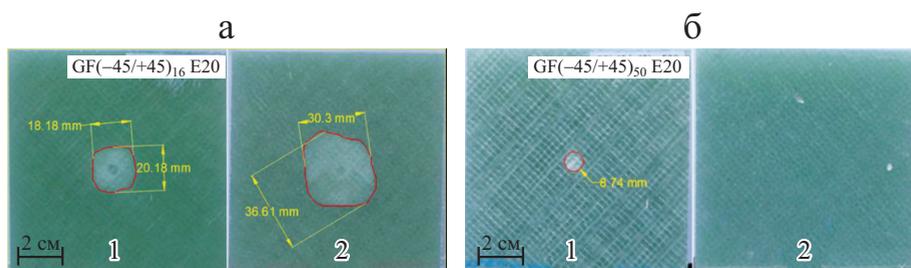


Рис. 8. Фотографии повреждений на передней (1) и задней (2) поверхностях тонких (а) и толстых (б) образцов композита с укладкой  $[-45^\circ/+45^\circ]$  после удара энергией 20 Дж.

больше, чем на передней, в силу действия растягивающих напряжений на задней поверхности [26, 27]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уровни энергии удара, использованные в экспериментах, не привели к значительным повреждениям в толстых образцах, т.е. толстые образцы способны сопротивляться большей энергии удара, чем тонкие.

**2.2. Влияние последовательности укладки.** Исследовали ударные характеристики тонких и толстых слоистых композитов с укладками  $[0^\circ/90^\circ]$ ,  $[30^\circ/60^\circ]$  и  $[-45^\circ/+45^\circ]$ . Поскольку при разной энергии удара наблюдали аналогичное поведение композитов, подробно обсудим влияние укладки при энергии удара 60 Дж.

На рис. 9 приведены временные зависимости контактной силы  $F-t$  для тонких и толстых образцов эпоксидных стеклопластиков с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$ ,  $[30^\circ/60^\circ]$  и  $[-45^\circ/+45^\circ]$ , подвергнутых удару с энергией 60 Дж. У тонких образцов пиковые значения контактной силы 22,15, 23,17 и 22,52 кН и время контакта 1,62, 1,43 и 1,66 мс соответственно. Различие наибольшего и наименьшего пиковых значений  $\sim 4,6\%$ . У толстых образцов пико-

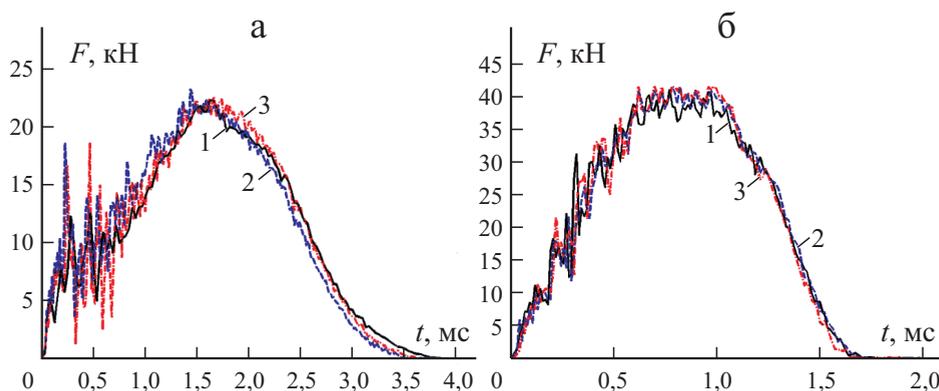


Рис. 9. Временные зависимости контактной силы  $F-t$  тонких (а) и толстых (б) композитов с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$  (1),  $[30^\circ/60^\circ]$  (2) и  $[-45^\circ/+45^\circ]$  (3) при ударе энергией 60 Дж.

вые значения контактной силы 40,83, 41,26 и 41,34 кН и время контакта 0,77, 0,82 и 0,7 мс  $\sim 1,23\%$ .

Экспериментальные и численные исследования показали, что можно выделить три стадии поврежденности слоистого композита: при небольшой энергии удара возникают только расслоения; при умеренной энергии удара — расслоения и повреждение матрицы; при большой энергии удара возникают сильные расслоения, повреждения матрицы и разрывы волокон [27]. При энергии удара 60 Дж на временных зависимостях  $F-t$  тонких слоистых композитов видны сильные колебания до того, как контактная сила достигла пикового значения, что может свидетельствовать о происходящем расслоении и повреждении матрицы. В толстых слоистых композитах эти колебания меньше. При данной энергии удара в верхних слоях толстых слоистых композитов наблюдали локальные повреждения в виде смятия матрицы и разрыва волокон вблизи точки удара.

На рис. 10 показаны фотографии передних и задних поверхностей тонких и толстых образцов слоистых композитов после удара с энергией 60 Дж. В тонких образцах площади повреждения на передней и задней поверхностях следующие: при укладке  $[0^\circ/90^\circ]$  — 1026,7 и 1629,79 мм<sup>2</sup> соответственно; при укладке  $[0^\circ/60^\circ]$  — 861,9 и 1368,5 мм<sup>2</sup> соответственно; при укладке  $[-45^\circ/+45^\circ]$  — 1030,96 и 1494,12 мм<sup>2</sup> соответственно. Наблюдали, что области расслоения сообразны с ориентацией слоев [26, 27]. Кроме того, в силу обратного эффекта площадь расслоения на задней поверхности больше, чем на передней, при всех рассмотренных укладках слоистых композитов.

В толстых образцах с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$ ,  $[30^\circ/60^\circ]$  и  $[-45^\circ/+45^\circ]$  площадь повреждения на передней поверхности 86,65, 91,95 и 90,07 мм<sup>2</sup> соответственно; на задней поверхности повреждения отсутствуют в силу большой жесткости (см. рис. 10).

Исследовали влияние ориентации слоев на ударные характеристики слоистых композитов с одинаковым размером образцов, количеством слоев и толщиной. В экспериментах наблюдали слабое влияние угла ориентации слоев на отклик композитов при ударе в силу очень жестких граничных условий, реализованных в установке на низкоскоростной удар. Изменения контактной силы были очень близкими у всех образцов с разной ориентацией слоев. Вообще говоря, по мере увеличения длины волокон в композитной пластине ее упругость также возрастает. Поэтому деформации под нагрузкой, возникающие в пластине, возрастут.

**2.3. Влияние величины энергии удара.** Тонкие и толстые композитные образцы подвергли ударам с энергией 20, 40 и 60 Дж. Уже наименьшая энергия удара вызывала заметные повреждения тонких и толстых композитных образцов. Поскольку при разной укладке композитов наблюдали аналогичное поведение, подробно обсудим влияние энергии удара на поведение тонких и толстых композитов с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$ . Временные зависимости контактной силы  $F-t$  и кинетической энергии  $E-t$ , а также фотографии повреждений на передней и задней поверхностях эпок-

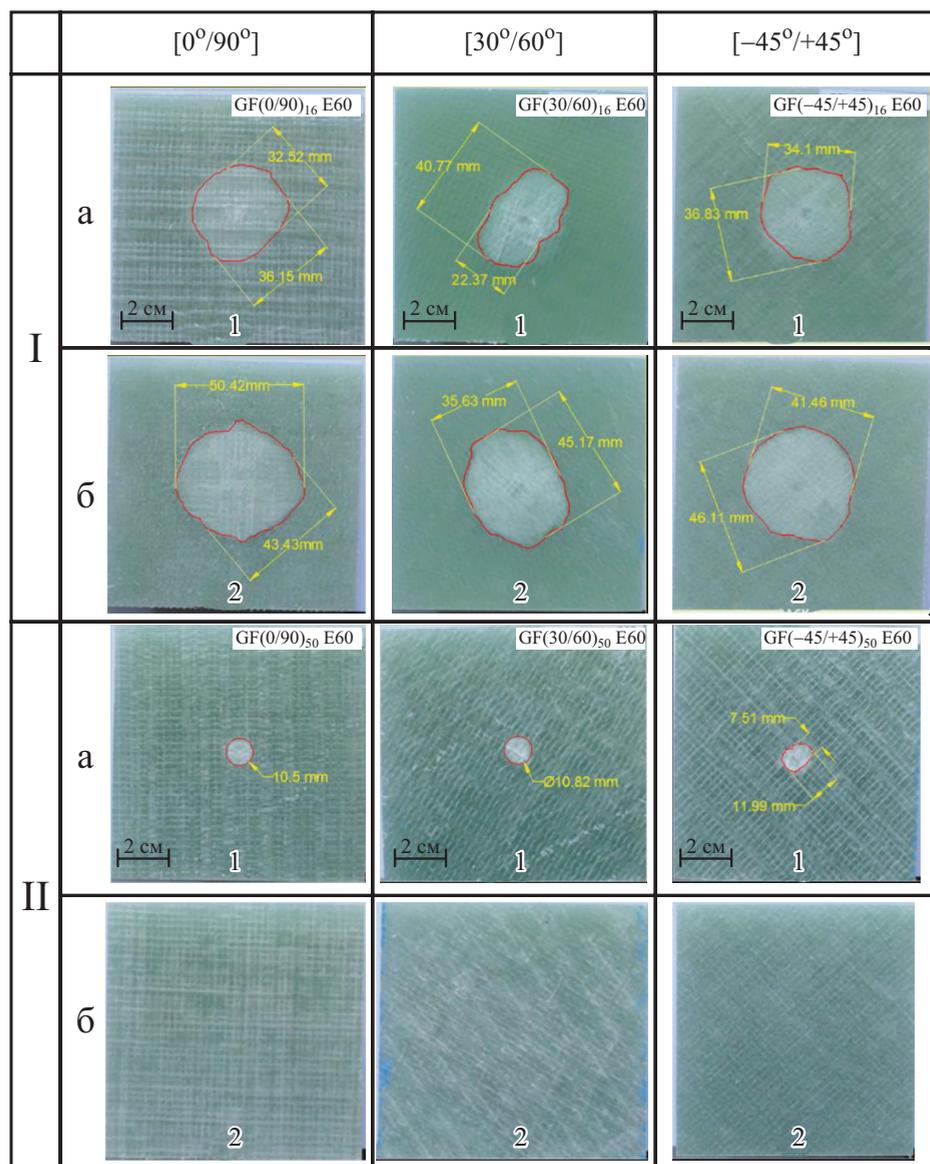


Рис. 10. Фотографии повреждений на передней (а) и задней (б) поверхностях тонких (I) и толстых (II) образцов композита с разными укладками после удара энергией 60 Дж.

сидных стеклопластиков с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$  после удара с энергией 20, 40 и 60 Дж приведены на рис. 11 и 12 для тонких и толстых образцов соответственно. Величина поглощенной энергии и пиковая контактная сила толстых и тонких композитов возрастали с увеличением энергии удара.

С увеличением энергии удара возрастала площадь повреждения на передней и задней поверхностях тонких слоистых композитов [26, 27]. Визуальный осмотр поврежденных тонких слоистых композитов свиде-

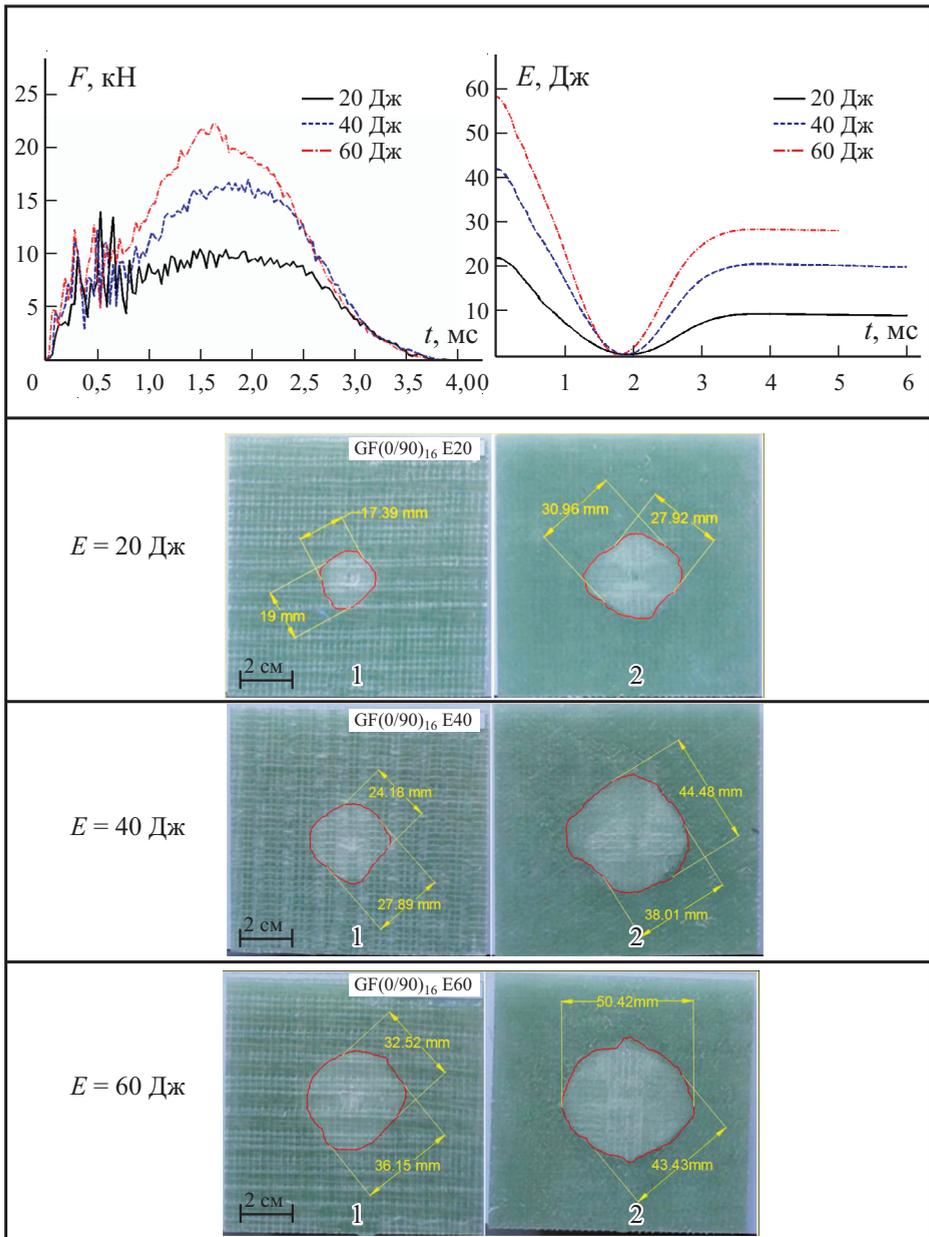


Рис. 11. Временные зависимости контактной силы  $F-t$  и кинетической энергии  $E-t$  и фотографии повреждений на передней (1) и задней (2) поверхностях тонкого композита с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]$  при ударе энергией 20, 40 и 60 Дж.

тествовал о растрескивании/смятии матрицы, разрыве волокон и расслоении, зависящих от доминирующей изгибающей нагрузки.

У толстых слоистых композитов небольшие области повреждения в виде разрыва волокон и смятия матрицы наблюдали только на передней по-

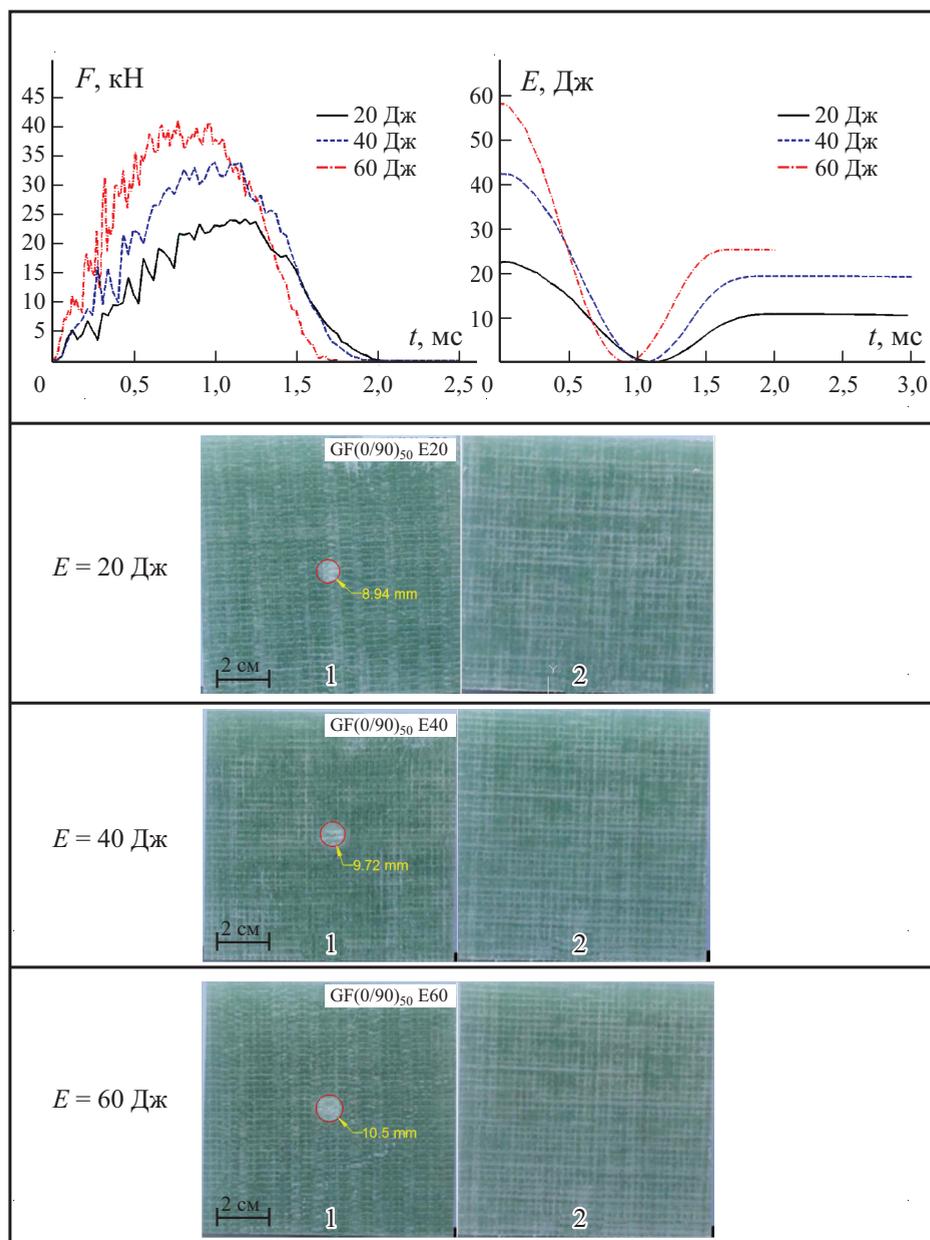


Рис. 12. То же для толстого композита.

верхности в районе точки удара, увеличивающиеся с увеличением энергии удара. В силу большой жесткости задняя поверхность толстых образцов при приложенных уровнях энергии удара не повреждалась.

## Заклучение

В настоящей работе при комнатной температуре экспериментально исследовали характеристики толстых (50 слоев) и тонких (16 слоев) эпоксидных стеклопластиков к укладками  $[0^\circ/90^\circ]$ ,  $[30^\circ/60^\circ]$  и  $[-45^\circ/+45^\circ]$  при ударе с энергией 20, 40 и 60 Дж. Установили, что контактная сила и прогиб слоистых композитов возрастают с увеличением энергии удара. При увеличении энергии удара в три раза пиковая контактная сила у всех тонких и толстых композитов с рассмотренными укладками возросла в 1,6—1,7 раза. Площадь повреждения на передней и задней поверхностях возрастала с увеличением энергии удара. Повреждения композитов на задней поверхности тонких образцов в силу действия растягивающих напряжений и расслоения, обусловленных изгибом, были значительно больше, чем на передней. При увеличении толщины пластин с 8 мм (16 слоев) до 25 мм (50 слоев) пиковое значение контактной силы возросло в 1,7—2 раза. Кроме того, с увеличением толщины образцов отношение поглощенной энергии к полной энергии удара уменьшалось. Для образцов одинаковой толщины при увеличении энергии удара максимальная контактная сила также возрастала, а продолжительность контакта изменялась незначительно. В толстых слоистых композитах большая часть энергии удара рассеивалась за счет упругих деформаций и меньше поглощалась в силу повреждения. Механизмы разрушения толстых и тонких слоистых композитов различны. В толстых композитах основной механизм разрушения — поперечный сдвиг, а в тонких — большие мембранные деформации. Влияние ориентации слоев на контактную силу тонких и толстых композитов оказалось незначительным в силу жестких граничных условий в экспериментальной установке. Наблюдали, что повреждения после удара связаны с ориентацией слоев в композите.

Работа выполнена при финансовой поддержке Группы координации научно-исследовательских проектов Университета Эрджиес в рамках исследовательского гранта № FYL-2017-7739.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reid S. R. and Zhou G. Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures. — Cambridge: CRC Press, Woodhead Publishing Ltd, UK, 2000.
2. Abrate S. Impact on Composite Structures. — Cambridge: Cambridge University Press, UK, 1998.
3. Baucum J. N. and Zikry M. A. Low-velocity impact damage progression in woven E-glass composite systems // Composites: Part A. — 2005. — Vol. 36, No. 5. — P. 658—664.
4. Gustin J., Joneson A., Mahinfalah M., and Stone J. Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites // Compos. Struct. — 2005. — Vol. 69, No. 4. — P. 396—406.

5. *Gómez-del Río T., Zaera R., Barbero E., and Navarro C.* Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature // *Composites: Part B.* — 2005. — Vol. 36, No. 1. — P. 41—50.
6. *Yyaner M. and Kara M.* Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact // *J. Compos. Mater.* — 2007. — Vol. 41, No. 24. — P. 2877—2896.
7. *Choi I. H.* Low-velocity impact analysis of composite laminates under initial in-plane load // *Compos. Struct.* — 2008. — Vol. 86, Nos. 1—3. — P. 251—257.
8. *Karakuzu R., Erbil E., and Aktas M.* Impact characterization of glass/epoxy composite plates: an experimental and numerical study // *Composites: Part B.* — 2010. — Vol. 41, No. 5. — P. 388—395.
9. *Evcı C. and Gülgeç M.* An experimental investigation on the impact response of composite materials // *Int. J. Impact Eng.* — 2012. — Vol. 43, May. — P. 40—51.
10. *Chirangivee K. R., Harsha S., and Akash D. A.* Computational analyses of effect of stacking orientation on low velocity impact behavior of GFRP composite laminates // *Int. J. Res. Eng. Technol.* — 2014. — Vol. 3, No. 3. — P. 978—982.
11. *Boumbimba R. M., Froustey C., Viot P., and Gerard P.* Low velocity impact response and damage of laminate composite glass fibre/epoxy based tri-block copolymer // *Composites: Part B.* — 2015. — Vol. 76, Jul. — P. 332—342.
12. *Khan S. H., Sharma A. P., and Parameswaran V.* An Impact induced damage in composite laminates with intra-layer and inter-laminate damage // *Procedia Eng.* — 2017. — Vol. 173. — P. 409—416.
13. *Bulut M. and Erklığ A.* An experimental investigation on damage characteristics of laminated hybrid composites subjected to low velocity impact // *Polym. Compos.* — 2018. — Vol. 39, No. 9. — P. 3129—3139.
14. *Taraghi I., Fereidoon A., and Taheri-Behrooz F.* Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperatures // *Mater. Des.* — 2014. — Vol. 53, Jan. — P. 152—158.
15. *Fakhreddini-Najafabadi S., Torabi M., and Taheri-Behrooz F.* An experimental investigation on the low-velocity impact performance of the CFRP filled with nanoclay // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2021. — Vol. 16, Sep. — P. 106858.
16. *Wen H. M.* Penetration and perforation of thick FRP laminates // *Compos. Sci. Technol.* — 2001. — Vol. 61, No. 8. — P. 1163—1172.
17. *Guillaud N., Froustey C., Dau F., and Viot P.* Impact response of thick composite plates under uniaxial tensile preloading // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 121, Mar. — P. 172—181.
18. *Jimenez A. G., Manes A., Beligni A., Dziendzikowski M. M., Sbarufatti C., and M. Giglio.* Modelling and experimental testing of thick CFRP composites subjected to low velocity impacts // *Procedia Struct. Integr.* — 2019. — Vol. 24. — P. 101—109.
19. *Duan M., Yue Z., and Song Q.* Investigation of damage to thick composite laminates under low-velocity impact and frequency-sweep vibration loading conditions // *Adv. Mech. Eng.* — 2020. — Vol. 12, No. 10. — P. 1—14.
20. *Sachse R., Pickett A. K., and Middendorf P.* Simulation of impact and residual strength of thick laminate composites // *Composites: Part B.* — 2020. — Vol. 195, Aug. — P. 1—16.
21. *Bulut M.* Low-velocity impact tests on basalt fiber/polypropylene core honeycomb sandwich composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2020. — Vol. 56, No. 1. — P. 121—130.
22. *Fallahi H., Taheri-Behrooz F., and Asadi A.* Nonlinear mechanical response of polymer matrix composites: A review // *Polym. Rev.* — 2020. — Vol. 60, No. 1. — P. 42—85.

23. ASTM International, D7136/D7136M – 12 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.

24. *Faggiani A. and Falzon B. G.* Predicting low-velocity impact damage on a stiffened composite panel // *Composites: Part A.* — 2010. — Vol. 41, No. 6. — P. 737—749.

25. *Sztefek P. and Olsson R.* Tensile stiffness distribution in impacted composite laminates determined by an inverse method // *Composites: Part A.* — 2008. — Vol. 39, No. 8. — P. 1282—1293.

26. *Azhdari S., Fakhreddini-Najafabadi S., and Taheri-Behrooz F.* An experimental and numerical investigation on low velocity impact response of GLAREs // *Compos. Struct.* — 2021. — Vol. 271, Sept. — P. 114123.

27. *Tuoa H., Lua Z., Maa X., Xinga J., and Zhang C.* Damage and failure mechanism of thin composite laminates under low-velocity impact and compression-after-impact loading conditions // *Composites: Part B.* — 2019. — Vol. 163, Apr. — P. 642—654.

Поступила в редакцию 01.10.2021

Окончательный вариант поступил 04.02.2022

Received Oct. 1, 2021 (Feb. 4, 2022)

---