

М. Багери Тофиги^а, Х. Биглари^{а}, М. М. Шокри^б*

^аDepartment of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Iran

^бComposites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА НА НИЗКОСКОРОСТНОЙ УДАР САНВИЧ-КОНСТРУКЦИЙ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ ПОЛИПРОПИЛЕНА, АРМИРОВАННОЙ ГРАФЕНОМ¹

M. Bagheri Tofighi, H. Biglari, and M. M. Shokrieh*

AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON LOW-VELOCITY IMPACT RESPONSE OF NANO-REINFORCED POLYPROPYLENE CORE SANDWICH STRUCTURES

Keywords: low-velocity impact, Johnson–Cook material model, sandwich structure, polypropylene, finite-element model

The impact behavior of sandwich structures was studied using experimental and numerical methods. Polypropylene with 0.5 wt% of graphene (PP/0.5% G) or pure polypropylene (PP) was sandwiched between aluminum face sheets for experimental tests. Impact tests revealed that the nanoreinforced structures had a higher contact force and a shorter contact duration than pure core structures. Both the damage area and the dent depth were lower for nano-reinforced structures. More energy absorbed the pure structures. The higher absorbed energy can be explained by the higher amount of damage that occurred in the structure. To further investigate the impact response of the sandwich structures, a three-dimensional quarter model was developed and implemented in the ABAQUS software. The strain-rate-dependent behavior of the core and face sheets was investigated using the Johnson–Cook material model to simulate the impact behavior of aluminum, PP, and G/PP layers.

*Автор, с которым следует вести переписку: hbiglari@tabrizu.ac.ir
Corresponding author: hbiglari@tabrizu.ac.ir

¹Перевод с англ.

Simulation results were compared with experimental data, and a good agreement between them was found to exist. The validated finite-element model was used for studying the effects of geometrical and material parameters, including the thickness of aluminum and PP layers, different weight ratios of nanoparticles, and different mechanical properties of the aluminum layers, on the impact response of sandwich structures. By introducing graphene up to 0.5 wt% into the PP material, all of the impact outputs reached their extremum amounts, which were considerably affected by the yield strength and elastic modulus of aluminum layers.

Ключевые слова: удар низкоскоростной, модель материала Джонсона—Кука, сэндвич-конструкция, полипропилен, модель конечно-элементная

Ударное поведение сэндвич-конструкций изучали экспериментальными и численными методами. Испытали сэндвич-конструкции с алюминиевыми лицевыми слоями и сердцевинной из чистого полипропилена (ПП) и наполненного 0,5% по массе графена (ПП/0,5% Г). Испытания на удар показали, что nanoармированные конструкции выдерживают большее контактное усилие и имеют меньшую продолжительность контакта, чем конструкции с неармированной сердцевинной. Nanoармированные конструкции имели меньшую площадь повреждения и глубину вмятины. Неармированные сэндвич-конструкции поглощали больше энергии удара в силу большего количества произошедших в них повреждений. Для дальнейшего исследования ударного отклика сэндвич-конструкций разработали и реализовали в программном обеспечении ABAQUS трехмерную конечно-элементную модель. Ударное поведение сердцевинной и лицевых слоев алюминия, ПП и ПП/Г в зависимости от скорости деформации исследовали с помощью модели материала Джонсона—Кука. Результаты моделирования сравнили с экспериментальными и установили хорошее согласование между ними. Апробированную конечно-элементную модель использовали при оценке влияния геометрических и материальных параметров, в том числе толщины слоев алюминия и полипропилена, массового содержания наночастиц и механических свойств слоев алюминия, на ударную прочность сэндвич-конструкций. Введение в ПП 0,5% по массе графена обеспечило максимальные характеристики при ударе, на которые существенно влияли предел текучести и модуль упругости алюминиевых слоев.

Введение

Использование гибридных материалов позволило выявить их особенности в сэндвич-конструкциях. Многослойные конструкции обладают большей устойчивостью к усталостным и ударным воздействиям за счет большей диссипации пластической энергии, чем монолитные. Слоистые композиты, в том числе металл—металл и полимер—металл, широко применяют в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Эти конструкции часто подвержены ударным воздействиям. Поэтому необходимо тщательно исследовать их поведение при ударе [1—3].

В [4] в полипропиленовую сердцевину сэндвич-конструкций добавляли разные микро- и наночастицы и изучали их влияние на поведение сэндвич-конфигураций при низкоскоростном ударе. В [5] исследовали характеристики сэндвич-композитов с полипропиленовой сердцевиной при низкоскоростном ударе в зависимости от толщины лицевого слоя. В [6] впервые экспериментально изучили отклик сэндвич-композитов с полиуретановой сердцевиной, наполненной частицами наноглины, на низкоскоростной удар. В [7] частицы наноглины вводили как в лицевые слои, так и в сердцевину сэндвич-панелей и оценили их ударопрочность. В [8] провели несколько ударных испытаний сэндвич-панелей при изучении влияния наноглины на ударные характеристики, включая контактную силу, продолжительность контакта, перемещение и рассеиваемую энергию. В [9] в качестве армирующего наполнителя сэндвич-панели с полиуретановой сердцевиной использовали разное по массе количество углеродных нановолокон. Наибольшую энергию удара рассеивали сэндвич-панели с содержанием 0,2% углеродных нановолокон. В [10] изготовили сэндвич-панели с сердцевиной из полистирола и лицевыми слоями из стекловолокон и наномодифицированной эпоксидной смолы. Ударные повреждения панелей в работе классифицировали по шести категориям: (i) едва заметные повреждения; (ii) докритические повреждения, т. е. треснутый лицевой слой и сердцевина; (iii) разрыв верхнего лицевого слоя и смятие сердцевины; (iv) потеря сцепления нижнего лицевого слоя с сердцевиной; (v) растрескивание нижнего лицевого слоя; (vi) разрыв и перфорация нижнего лицевого слоя. В [11] изготовили образцы сэндвич-композита с лицевыми слоями на основе стекловолокон и эпоксидной смолы и с сердцевиной из пробкового дерева. Лицевые слои изготовили с наполнением наноарматурой и без неё. Сэндвич-панели с наноармированием продемонстрировали большие максимальные ударные нагрузки, меньшие перемещения, наилучшие характеристики с точки зрения упругой рекуперации и максимальную остаточную прочность при изгибе. В [12] провели испытания на низкоскоростной удар для оценки влияния многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) на внутреннее и внешнее повреждение сэндвич-панелей с пенопластовой сердцевиной и лицевыми слоями из кевларовых волокон и эпоксидной смолы.

В [13] исследовали влияние добавления триблоков сополимера Nano-strength M52N на низкоскоростной удар сэндвич-панелей с лицевыми слоями из органопластика и сердцевины из пенопластика Rohacell. Путем программного обеспечения LS-Dyna FE разработали численную модель и закон состояния, основанный на механике повреждения сплошной среды, использованные для моделирования композитных лицевых слоев с наноармированием и без него. Входные параметры, относящиеся к жесткости и прочности композита, определили в ходе механических испытаний. В [14] представили трехмерное решение, основанное на рядах Фурье и обобщенном методе дифференциальных квадратур для моделирования удара по сэндвич-панели с лицевыми слоями с наноармированием и проверили теоретическую модель посредством ударных экспериментов. В [15] для изучения ударного поведения сэндвич-конструкций с наноармированием представлен теоретический анализ, основанный на модифицированной теории сэндвич-панелей высокого порядка. Рассмотрели три распределения углеродных нанотрубок в лицевых слоях: равномерное распределение и два функционально-градиентных ФГ-V и ФГ-Л. Сэндвич-балка с лицевыми листами ФГ-V продемонстрировала наибольшее контактное усилие и наименьший прогиб.

В настоящее время для уменьшения массы механических деталей все чаще используют легкие материалы, такие как полимеры [16]. Полипропилен, как разновидность термопластичных полимеров, широко используют в упаковочной, автомобильной и аэрокосмической отраслях промышленности. Полипропилен представляет собой полимер низкой плотности с превосходными электрическими и механическими характеристиками. Его используют во внутренних панелях автомобилей в силу возможности вторичной переработки. В [17] изучали обработку поверхности образцов полипропилена для улучшения прочности сцепления полипропилена с алюминиевыми пластинами. Авторам настоящей работы не известны исследования по конечно-элементному моделированию сэндвич-пластин из алюминия/полипропилена/алюминия (AL/ПП/AL) при низкоскоростном ударе. Большинство предыдущих исследований сэндвич-пластин с наноармированием выполнены экспериментально или аналитически. В настоящем исследовании наночастицы графена использовали в качестве армирующего материала сердцевины сэндвич-пластин AL/ПП/AL. Материал сердцевины смоделировали с использованием модели материала Джонсона—Кука, параметры для которой получили инновационным методом [18]. В настоящей работе исследовали, подходят ли постоянные материала Джонсона—Кука для моделирования поведения наноармированного полипропилена, зависящее от скорости деформации.

1. Эксперимент

Для оценки влияния наночастиц и разных условий нагружения на ударные характеристики сэндвич-конструкций AL/ПП/AL с чисто поли-

пропиленовой и nanoармированной сердцевиной провели испытания на низкоскоростной удар.

1.1. Исходные материалы. Полипропилен в виде порошка поставлен компанией Shazand Petrochemical Corporation (Arak), а nanoграфеновые пластинки — компанией API Technology Pioneers. Nanoпластинки максимальным размером 10 и 45 мкм имели максимальное количество чешуек по толщине. Алюминий 1050-Н14 поставлен в виде пластин размером 1×2 м и толщиной 1 мм. В настоящем экспериментальном исследовании использовали двухкомпонентный эпоксидный клей Megarox™.

1.2. Изготовление пластин из чистого и армированного графеном полипропилена. Основные операции при изготовлении nanoармированного полипропилена: обработка ультразвуком и механическое перемешивание. Частицы графена погрузили в спирт и выполняли основные операции в течение 30 мин. На следующем этапе добавили частицы полипропилена и снова выполняли основные операции в течение 30 мин. Полученную смесь вылили в квадратную форму необходимого размера и поместили в печь при температуре 250 °С для расплавления частиц ПП. Изготовили пластины nanoкомпозита ПП/Г с разным содержанием графена по массе. На рис. 1 показаны пластины из чистого полипропилена и армированного 0,5% по массе графена. Малое массовое содержание графена использовали для снижения его агломерации. В [18] показано, что наилучшее повышение ударной прочности реализовали при введении 0,5% по массе графена. Большее количество графена не улучшало ударный отклик nanoармированного полипропилена.

1.3. Поверхностная обработка слоев алюминия и полипропиленовых пластин. При изготовлении сэндвич-конструкций использовали клеяые соединения. Для достижения прочного соединения лицевых слоев алюминия и полипропиленовой сердцевины провели их поверхностную обработ-

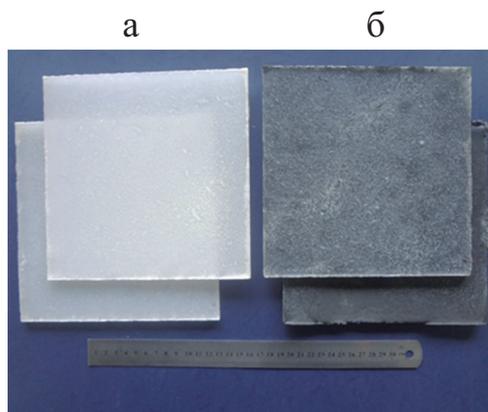


Рис. 1. Пластины из чистого (а) и армированного 0,5% по массе графеном (б) полипропилена.

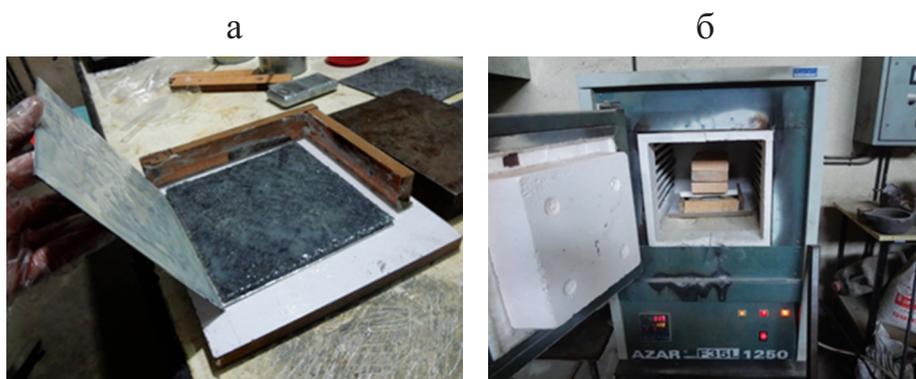


Рис. 2. Изготовление сэндвич-конструкций AL/ПП/AL: нанесение клея на внутренние поверхности слоев (а) и каркас с преформой в печи (б).

ку. На поверхности ПП и ПП/Г нанесли царапины для проникновения клея в полипропилен. Химическое соединение Aston использовали для очистки алюминиевых поверхностей. Для удаления примесей с алюминиевых поверхностей использовали метод травления смесью дихромата натрия и серной кислоты [19]. Сразу после поверхностной обработки алюминиевых слоев их склеили с сердцевиной во избежание загрязнения.

1.4. Изготовление сэндвич-конструкций AL/ПП/AL. В качестве прокладок между слоями алюминия и полипропилена использовали тонкую проволоку диаметром 0,4 мм, равным толщине клеевого слоя в опытных образцах. Для фиксации скользящего движения слоев алюминия и полипропилена в ходе отверждения клея изготовили деревянный каркас. Для предотвращения прилипания сэндвич-конструкции к каркасу в ходе отверждения клея его обработали силиконовым гелем. Алюминий и полипропиленовую сердцевину склеивали адгезивом Мегарох™/отвердитель 10:8. Форму с помещенной в неё преформой сэндвич-конструкции помещали в печь при температуре 120 °С на 2 ч для быстрого отверждения клея.

Табл. 1

Схема испытаний сэндвич-конструкций AL/ПП/AL на низкоскоростной удар

Испытание	Сердцевина	Высота, см	Масса, кг	Энергия, Дж	Скорость, м/с	Импульс, кг·м/с
1	ПП	25	2,7	6,6	2,2	5,94
2	ПП/Г	25	2,7	6,6	2,2	5,94
3	ПП	57,4	2,7	15,2	3,35	9,04
4	ПП/Г	57,4	2,7	15,2	3,35	9,04
5	ПП	25	6,2	15,2	2,2	13,64
6	ПП/Г	25	6,2	15,2	2,2	13,64

Разные этапы изготовления сэндвич-конструкции AL/ПП/AL показаны на рис. 2.

1.5. Испытания на низкоскоростной удар для изучения поведения сэндвич-конструкций AL/ПП/AL с чисто полипропиленовой и nanoармированной сердцевиной провели на установке с падающим грузом. В качестве мишени для удара рассматривали квадрат со стороной 15 см в

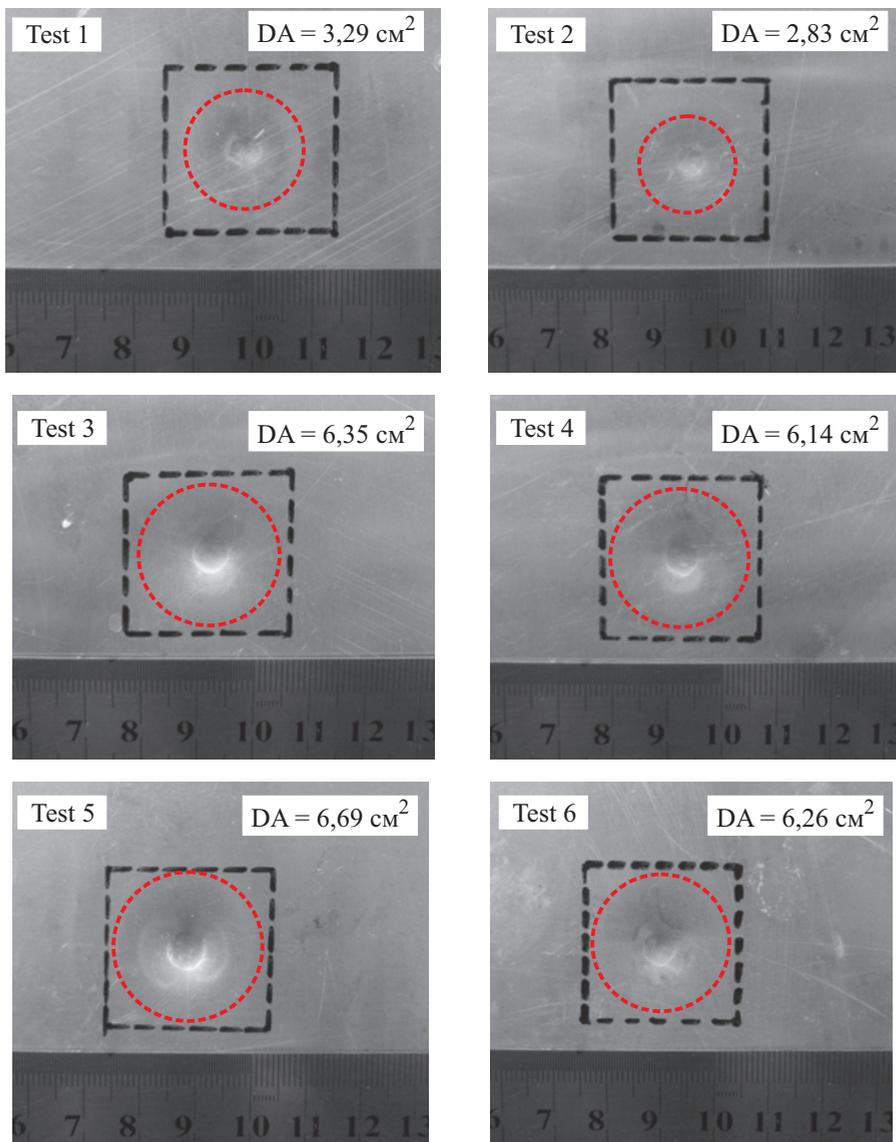


Рис. 3. Площадь повреждения DA лицевой поверхности сэндвич-пластин с сердцевиной из чистого (испытания 1, 3, 5) и nanoармированного (испытания 2, 4, 6) полипропилена.

центре наружной поверхности сэндвич-конструкций, края которых закрепили в захватах.

Схема испытаний на низкоскоростной удар представлена в табл. 1. Использовали полусферические жесткие ударники радиусом 8,1 мм с разной массой и энергией удара (см. табл. 1). Испытания (1, 2), (3, 4) и (5, 6) выполнили при одинаковых характеристиках ударника, но разной сердцевине (чисто полипропиленовой или наноармированной).

1.6. Результаты ударных испытаний. Диаграммы ускорение—время строили с помощью акселерометра, расположенного сразу за ударником. Контактную силу вычисляли как произведение ускорения ударника на его массу. Длительность контакта рассматривали как полное время диаграммы ускорение—время. Для измерения площади повреждения на передней поверхности и максимального постоянного поперечного перемещения наружной и задней поверхностей сэндвич-конструкции использовали программное обеспечение ImageJ для обработки изображений [20]. Глубину вмятины в области мишени принимали за максимальное остаточное поперечное перемещение наружной поверхности. Площадь повреждения DA рассматривали как круглую деформированную область точно в центре наружной поверхности. Радиус зоны повреждения принимали равным постоянному пластическому радиусу PR , связанному с площадью повреждения соотношением $DA = \pi (PR)^2$. Определить пластический радиус было трудно, поскольку область повреждения расширялась в центре, а радиус области вмятины в программе определяли визуально. Поэтому сначала визуально определяли радиус вмятины, а пластический радиус для всех испытаний принимали в четыре раза большим радиуса вмятины. Остаточную скорость ударника рассчитывали, вычитая площадь под кривой ускорения из начальной скорости ударника. Затем остаточную кине-

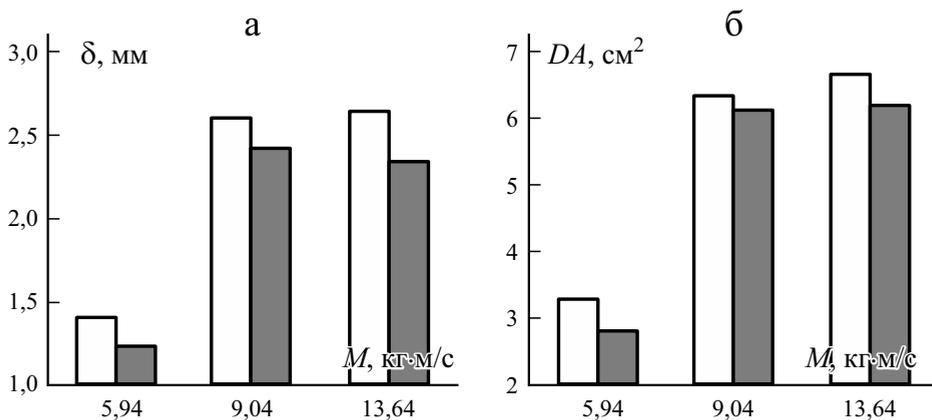


Рис. 4. Глубина вмятины δ и площадь повреждения DA сэндвич-пластин с сердцевиной из чистого (□) и наноармированного (■) полипропилена при разном импульсе удара M (см. табл. 1).

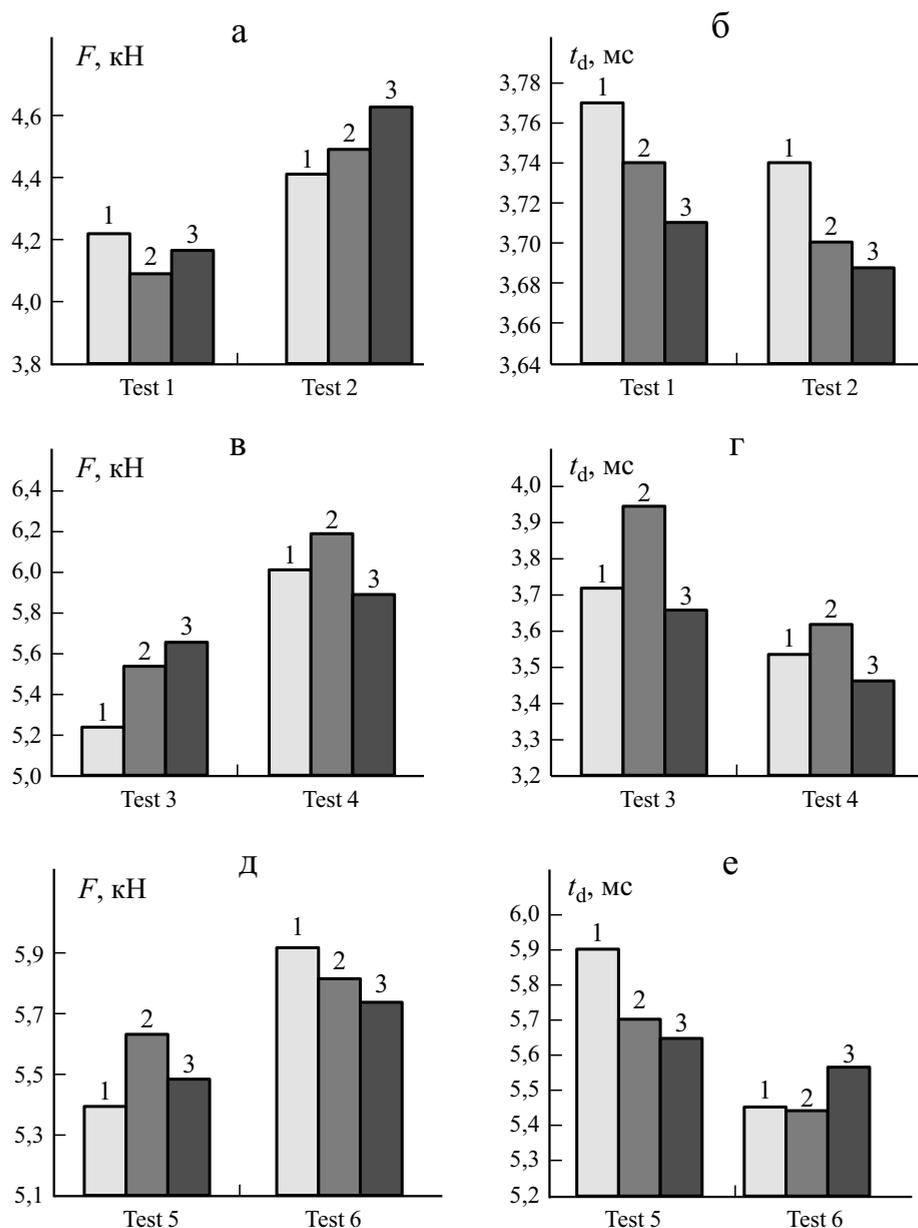


Рис. 5. Разброс экспериментальных результатов контактной силы F (а, в, д) и продолжительности контакта t_d (б, г, е) в испытаниях 1 и 2 (а, б), 3 и 4, (в, г), 5 и 6 (д, е).

тическую энергию ударника вычисляли с помощью его остаточной скорости.

Фотографии рис. 3 иллюстрируют область повреждения на лицевой поверхности сэндвич-конструкций (показана штриховыми окружностями) с чисто полипропиленовой и наноармированной сердцевиной при разной массе и скорости ударника. Согласно данным рис. 3 площадь поврежде-

ния сэндвич-конструкций с наноармированной сердцевинной меньше, но возрастает с увеличением энергии удара.

Глубина вмятины и площадь повреждения сэндвич-конструкций с сердцевинной из чистого ПП больше, чем с армированной 0,5% по массе графена (рис. 4).

Каждое испытание выполняли на трех образцах (1—3). Среднее значение трех измерений принимали за конечный экспериментальный результат. Разброс экспериментальных данных для контактной силы и продолжительности контакта представлен на рис. 5. Ту же процедуру использовали для других ударных характеристик. Из сравнения результатов повторных испытаний сэндвич-пластин с чисто полипропиленовой и наноармированной сердцевинами (см. рис. 5) видно, что ни одна из ударных характеристик образцов с наноармированной сердцевинной не находится в диапазоне таковых образцов с чисто полипропиленовой сердцевинной. Например, максимальное значение контактного усилия 4,22 кН при чисто полипропиленовой сердцевине наблюдали в испытании 1 образца 1, тогда как в случае наноармированной сердцевинной минимальное значение контактного усилия 4,41 кН зарегистрировали в испытании 2 образца 1. Таким образом, даже в худшем случае контактное усилие образцов с наноармированной сердцевинной больше, чем с чисто полипропиленовой. Такой результат наблюдали во всех ударных испытаниях, за исключением некоторых редких случаев. Например, продолжительность контакта в испытании 2 (образец 1) больше, чем в испытании 1 (образец 3) (см. рис. 5—б). Однако средняя продолжительность контакта в испытании 1 больше, чем в испытании 2.

2. Конечно-элементное моделирование

Для моделирования ударного поведения сэндвич-компози́тов выполнили анализ методом конечных элементов (МКЭ). Исследовали влияние скорости деформации и введения наночастиц графена в полипропиленовую сердцевину. Параметры модели Джонсона—Кука для наноармированного полипропилена определили в [18] с помощью микромеханической модели, зависящей от скорости деформации (ММЗСД). В настоящей работе постоянные материала Джонсона—Кука использовали при моделировании низкоскоростного ударного поведения слоев ПП/Г, зависящего от скорости деформации ударного поведения. Хотя применяемую конечно-элементную модель уже использовали в предыдущих исследованиях, в настоящей работе даны некоторые пояснения к ее уравнениям, позволяющие опытному практику или эксперту воспроизвести результаты. Уравнение состояния полимеров Голдберга, модель микромеханики Халпина—Цая, уравнение состояния полимеров, наполненных наночастицами (ММЗСД) и способ определения параметров модели материала Джонсона—Кука для ПП и ПП/Г кратко представлены в последующих разделах. Затем дано пояснение для модели материала клеевого слоя и детали трехмерной конечно-эле-

ментной модели. После этого представлены численные результаты, сопоставленные с экспериментальными. Наконец, влияние разных параметров, включая толщину алюминиевых и полипропиленового слоев, разное массовое содержание наночастиц и разные механические свойства алюминиевых слоев оценили на основе апробированной конечно-элементной модели.

2.1. Уравнение состояния полимеров. Модель Голдберга разработана в [21] для предсказания механического поведения чистых полимеров; поле напряжений полимеров можно рассчитать по полям деформаций. Неупругую деформацию определили как

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^I = 2D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z}{\sigma_e} \right)^{2n} \right] \left(\frac{S_{ij}}{2\sqrt{J_2}} + \alpha \delta_{ij} \right), \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^I$ — тензор неупругих скоростей деформации, определяемый как функция девиаторного напряжения S_{ij} ; J_2 — второй инвариант тензора девиаторных напряжений; Z и α — переменные состояния; D_0 — максимальная скорость неупругой деформации; n — чувствительность материала к скорости деформирования. Эффективное напряжение σ_e определено как

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} + \sqrt{3}\alpha\sigma_{kk}, \quad (2)$$

где σ_{kk} — сумма нормальных напряжений, равная трем главным напряжениям. Переменные состояния Z и α представлены как

$$\dot{Z} = q(Z_1 - Z)\dot{e}_e^I, \quad (3)$$

$$\dot{\alpha} = q(\alpha_1 - \alpha)\dot{e}_e^I, \quad (4)$$

$$\dot{e}_e^I = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^I \dot{\varepsilon}_{ij}^I}, \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^I = \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{\dot{\varepsilon}_{kk}^I}{3} \delta_{ij}, \quad (6)$$

где q характеризует влияние скорости упрочнения; Z_1 , α_1 , Z_0 , α_0 — максимальные и начальные значения Z и α соответственно; \dot{e}_e^I — эффективная девиаторная скорость неупругой деформации. Процедура определения параметров материала, включая D_0 , n , Z_1 , Z_0 , α_1 , α_0 , q , описана в [21]. Используя модель Голдберга, в [18] получили кривые деформирования чистого полипропилена.

2.2. Микромеханическая модель Халпина—Цая. Механические свойства композитов прогнозировали в разных исследованиях с помощью разных микромеханических методов, в том числе Халпина—Цая, Мори—Танака, Нильсена и др. Модуль упругости нанофазного полимера

предсказали путем комбинирования механических свойств полимера и наночастиц. Уравнения модели Халпина—Цая [22] имеют вид

$$\frac{E}{E_m} = \frac{3}{8} \frac{1 + 2(l/d)\eta\nu_f}{1 - \eta\nu_f} + \frac{5}{8} \frac{1 + 2\eta\nu_f}{1 - \eta\nu_f}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{(E_f / E_m) - (d / 4t)}{(E_f / E_m) + (d / 2t)}, \quad (8)$$

где E , E_m , E_f — касательный модуль упругости композита, полимерной матрицы и арматуры соответственно; ν_f — объемное содержание арматуры; l и d — средняя длина и диаметр армирующих частиц соответственно.

2.3. Микромеханическая модель, зависящая от скорости деформации (ММЗСД), представлена в [22] в качестве уравнения состояния наноармированных полимеров для предсказания их деформационного поведения при разных скоростях деформации.

Модель ММЗСД представляет собой комбинацию моделей Голдберга и Халпина—Цая. В [18] построили кривые деформирования чистого полипропилена, используя модель Гольдберга, и нанокompозита ПП/Г при разных скоростях деформации.

2.4. Описание характеристик модели материала Джонсона—Кука как входных данных для МКЭ. Кривые деформирования ПП и ПП/Г при разных скоростях деформации послужили предпосылкой для определения параметров Джонсона—Кука. Поведение ПП и ПП/Г в зависимости от скорости деформации смоделировали с помощью модели материала Джонсона—Кука [18]. В уравнении использовали параметры модели Джонсона—Кука

$$\sigma = \left[A + B\varepsilon_p^n \right] \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) \right], \quad (9)$$

где A , B , C , n — постоянные материала: A — предел текучести при эталонной скорости деформации; B и n — коэффициенты деформационного упрочнения; C — коэффициент чувствительности к скорости деформации. Параметры $\dot{\varepsilon}^*$, σ , ε_p — безразмерная скорость пластической деформации, напряжения течения, эквивалентная пластическая деформация соответственно. Безразмерная скорость пластической деформации $\dot{\varepsilon}^*$ связана с эталонной скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_0$ посредством уравнения

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}, \quad (10)$$

где $\dot{\varepsilon}_0$ может иметь безразмерное выражение в натуральных логарифмах.

Табл. 2

Параметры материала слоев AL, ПП, ПП/Г [18]

Материал	ρ , кг/м ³	E , ГПа	ν	A	B	n	C
				МПа			
ПП	900	1,071	0,4	23	33,86	0,544	0,0643
ПП/0,5% по массе Г	900	1,305	0,4	23,065	49,74	0,6309	0,0719
ПП/1% по массе Г	900	1,061	0,4	23,03	46,25	0,5867	0,0668
ПП/2% по массе Г	900	0,92	0,4	23,01	30,83	0,3911	0,0445
AL 1050-H14	2710	71	0,33	102	97	0,18	0,01

Для получения кривых деформирования ПП и ПП/Г использовали четыре скорости деформирования: 0,0000667, 0,00667, 1,67 и 30 с⁻¹.

Величину A рассчитывали по пределу текучести экспериментальных кривых условные напряжение—деформация для ПП и ПП/Г. Постоянные B и n определяли из зависимости между логарифмом пластического напряжения и логарифмом пластической деформации. Постоянная C представляет собой наклон отношений динамического напряжения к статическому при пластической деформации 2% в зависимости от натурального логарифма скорости деформации в данном испытании. Значения постоянных модели Джонсона—Кука для ПП и ПП/Г, а также алюминия 1050—H14 приведены в табл. 2, а для nanoармированного полипропилена определены ранее в [18]. В настоящей работе постоянные материалов по модели Джонсона—Кука использовали для моделирования ударного поведения слоев AL, ПП и ПП/Г.

Согласно [2] параметры материала, в том числе предел текучести и модуль упругости, оказывают сильное влияние на поведение многослойных

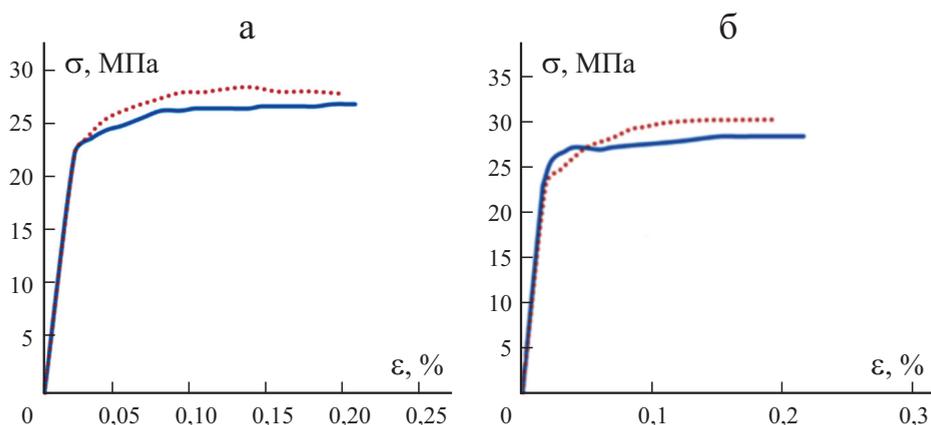


Рис. 6. Сравнение кривых напряжение—деформация σ — ϵ при растяжении, полученных в настоящей работе (—) и [18] (···) для ПП (а) и ПП/Г (б).

конструкций при низкоскоростном ударе. В разделе 2.4 экспериментальные кривые деформирования для ПП и ПП/Г сравнили с эталонными результатами [18] для характеристики идентичного статического поведение материалов в обоих исследованиях. Для выявления сходства динамического поведения материалов в обоих исследованиях провели несколько новых экспериментов, но путем сравнения параметров модели Джонсона—Кука.

Экспериментальные испытания на растяжение по стандарту ASTM D638 провели на материалах ПП и ПП/Г и сравнивали с эталонными результатами [18]. Образцы для испытаний изготовили из пластин ПП и ПП/Г.

На рис. 6 представлены кривые напряжение—деформация материалов, использованных в настоящем исследовании и в [18].

2.5. Модель материала для клеевого слоя Мегарох™. Для клеевого слоя рассматривали модель упругопластического материала. Испытания на растяжение в соответствии со стандартом ASTM D638 провели на образцах клея Мегарох™. Техническая (номинальная) кривая напряжение—деформация показана на рис. 7 и подтверждена результатами [23].

Кривую истинные напряжение—деформация клеевого материала вычислили в некоторых выбранных точках с использованием уравнений

$$\sigma_{\text{True}} = \sigma_{\text{eng}} (1 + \varepsilon_{\text{eng}}), \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{True}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{eng}}), \quad (12)$$

где σ_{True} , $\varepsilon_{\text{True}}$, σ_{eng} , ε_{eng} — истинные напряжение и деформация, условные напряжение и деформация соответственно [18]. Значения напряжения и деформации для эпоксидного клея представлены в табл. 3. Характеристики эластичного материала клея: плотность 1100 кг/м³, модуль упругости 0,36 ГПа, коэффициент Пуассона 0,4. Упругопластическое

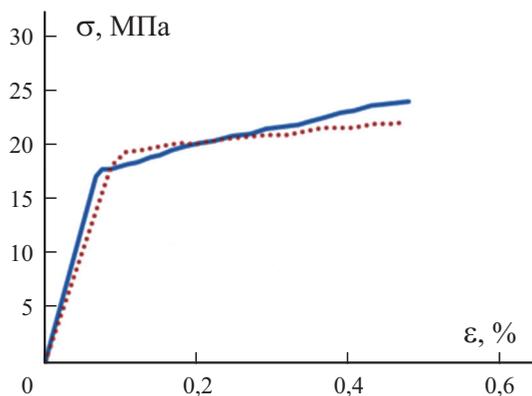


Рис. 7. Кривые условные напряжение—деформация $\sigma - \varepsilon$ адгезива Мегарох, полученные в настоящей работе (—) и [23] (···).

Табл. 3

Напряжения и деформации эпоксидного адгезива Мегарох

Номинальное напряжение, МПа	Номинальная деформация	Истинное напряжение, МПа	Истинная деформация	Пластическая деформация
18	0,05	18,9	0,0488	0
20	0,1	22,0	0,0953	0,0465
21	0,2	25,2	0,1823	0,01335
22	0,3	28,6	0,2624	0,02136
24	0,4	33,6	0,3365	0,2877

поведение клеевого слоя определили с помощью полилинейной модели пластичности по данным, приведенным в табл. 3.

2.6. Конечно-элементная модель четверти конструкции и условия нагружения. Размеры, используемые в данном разделе, выбрали по результатам экспериментальных испытаний. Для моделирования низкоскоростного удара выбрали сэндвич-пластину 18×18×0,68 см. Для четверти этой пластины создали трехмерную конечно-элементную модель (рис. 8), по которой ударял жесткий ударник (масса и скорость указаны в табл. 1). Толщина клеевого слоя 0,4 мм, слоя ПП 4 мм, слоя AL 1 мм. Сцепление поверхностей слоев клея, ПП и AL считали идеальным и описывали, используя опции, имеющиеся в программном обеспечении. В модели пренебрегли распространением трещины и отрывом клеевого слоя. Трение между ударником и лицевым слоем пластины-мишени задали в параметрах свойств контакта: коэффициент трения 0,3 в тангенциальном направлении и вариант жесткого контакта — в нормальном направлении.

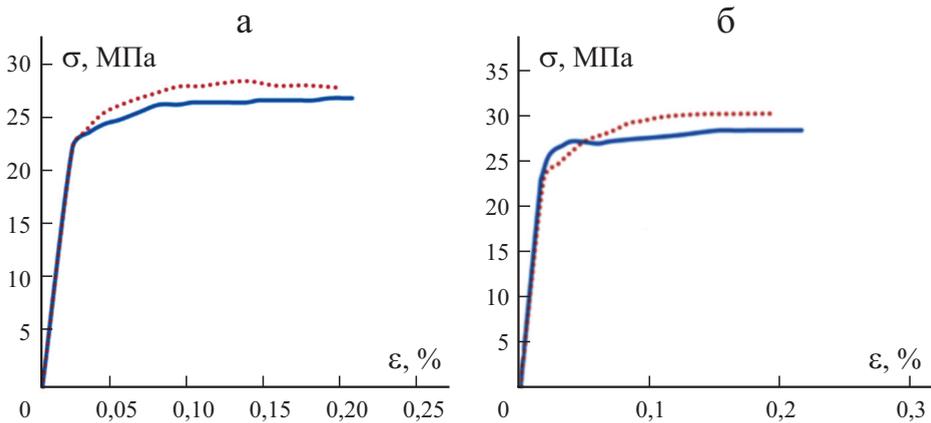


Рис. 8. Конечно-элементная модель ударника и сэндвич-пластины: вид спереди (а), в изометрии (б) и плотность конечно-элементной сетки по толщине (в).

Конечно-элементные модели для сандвич-мишени разработали в программном обеспечении ABAQUS Explicit, используя линейные шестигранные конечные элементы C3D8R. Как видно из данных рис. 8, более плотную конечно-элементную сетку использовали в центральной области сандвич-пластин для повышения точности результатов и лучшего описания нелинейного поведения контакта. Кроме того, изучили сходимость конечно-элементного решения с учетом влияния плотности сетки на силу и продолжительность контакта с целью выбора достаточного количества конечных элементов. Каждый слой AL, клея и ПП разделили по толщине на 2, 6 и 8 секций соответственно. Таким образом, каждый миллиметр по толщине слоев AL и ПП разделили на два элемента. По результатам изучения сходимости выбрали конечно-элементную сетку из 34 560 элементов.

2.7. Подтверждение достоверности. Результаты расчета МКЭ сравнивали с экспериментальными, описанными в разделе 1.6. Испытания (1 и 2), (3 и 4), (5 и 6) рассматривали, как парные с одинаковыми характеристиками ударника, но с разным материалом сердцевины (чисто полипропиленовой или nanoармированной). Численные и экспериментальные значения ударных характеристик, приведенные в табл. 4, демонстрируют их согласование в допустимых пределах. Как видно из данных табл. 4, сандвич-пластины с nanoармированной сердцевиной продемонстрировали большую остаточную кинетическую энергию ударника, чем с чисто полипропиленовой, а постоянный пластический радиус у них был меньше. Большую поглощенную энергию (меньшую остаточную кинетическую энергию ударника) можно интерпретировать как большее количество повреждений (большой пластический радиус), произошедших в конструкции.

Из экспериментальных результатов парных испытаний (1, 2) (см. табл. 4) можно сделать вывод о том, что введение наночастиц в сердцевину сандвич-конструкций без изменения характеристик ударника увеличило контактное усилие и остаточную кинетическую энергию ударника на 8,41 и 2,85% соответственно и уменьшило длительность контакта на 0,8%, максимальные остаточные поперечные перемещения наружной и задней поверхностей сандвич-конструкций — на 12,06 и 6,02% соответственно, постоянный пластический радиус — на 7,23%. Сравнение экспериментальных результатов парных испытаний (3, 4) (см. табл. 4) показало увеличение контактной силы и остаточной кинетической энергии ударника — на 10,22 и 0,6% соответственно и уменьшение продолжительности контакта — на 6,35%, максимальных остаточных поперечных перемещений наружной и задней поверхностей — на 7,25, 17,07% соответственно, постоянного пластического радиуса — на 1,69%. Увеличение контактной силы и остаточной кинетической энергии ударника в парных испытаниях (5, 6) (см. табл. 4) — на 5,82 и 2,19% соответственно, уменьшение продолжительности контакта — на 4,52%, максимальных остаточных

Табл. 4

Различие (%) экспериментальных (ЭР) и численных (ЧР) результатов

Ударная характеристика		Номер испытания (ударный импульс, кг·м/с)					
		1 (5,94)	2 (5,94)	3 (9,04)	4 (9,04)	5 (13,64)	6 (13,64)
Максимум поперечного перемещения наружной поверхности, мм	ЭР	1,41	1,24	2,62	2,43	2,64	2,34
	ЧР (%)	1,475 (4,61)	1,362 (9,84)	2,753 (5,08)	2,615 (7,61)	2,741 (3,82)	2,602 (11,19)
Максимум поперечного перемещения задней поверхности, мм	ЭР	0,83	0,78	2,05	1,7	2,14	1,92
	ЧР (%)	0,7777 (-6,30)	0,7212 (-7,54)	1,863 (-9,12)	1,758 (3,41)	1,875 (-12,38)	1,779 (-7,34)
Постоянный пластический радиус, мм	ЭР	10,23	9,49	14,22	13,98	14,60	14,12
	ЧР (%)	10,491 (2,55)	10,235 (7,85)	15,464 (8,75)	15,152 (8,38)	15,205 (4,14)	15,120 (7,08)
Остаточная кинетическая энергия ударника, Дж	ЭР	2,81	2,89	5,16	5,19	5,03	5,14
	ЧР (%)	2,757 (-1,89)	2,803 (-3,01)	4,868 (-5,66)	4,899 (-5,61)	4,836 (-3,86)	4,890 (-4,86)
Максимум контактной силы, кН	ЭР	4,16	4,51	5,48	6,04	5,50	5,82
	ЧР (%)	4,339 (4,30)	4,709 (4,41)	5,836 (6,50)	6,138 (1,62)	5,832 (6,04)	6,017 (3,38)
Время контакта, мс	ЭР	3,74	3,71	3,78	3,54	5,75	5,49
	ЧР (%)	3,509 (-6,18)	3,413 (-8,00)	3,533 (-6,53)	3,443 (-2,74)	5,352 (-6,92)	5,193 (-5,41)

поперечных перемещений наружной и задней поверхностей — на 11,36 и 10,28%, постоянного пластического радиуса — на 3,29%.

На рис. 9 показаны зависимости контактной силы от времени для сэндвич-конструкций с чисто полипропиленовой и наноармированной сердцевинами. Как экспериментальные, так и численные зависимости сила—время имели повышенный уровень шума, что характерно для динамических испытаний с откликом в виде колебаний относительно средней кривой. Для получения сглаженных кривых сила—время применили схему усреднения. Линию тренда для численных кривых подгоняли под экспериментальные с помощью фильтра ButterworthFilter, имеющегося в программном обеспечении ABAQUS. Испытания 1, 3 и 5 соответствуют сэндвич-конструкциям с сердцевиной из чистого полипропилена, а испытания 2, 4 и 6 — с наноармированной сердцевиной. Испытания (1, 2), (3, 4) и (5, 6) рассматривали как парные эксперименты с одинаковыми характеристиками ударника, но с разной сердцевиной (чисто полипропиленовой или наноармированной). Как численные, так и экспериментальные диаграммы демонстрируют, что добавление наночастиц графена в сердцевину ПП увеличивало усилие контакта, но уменьшало его длительность. Сравнение результатов испытаний (1, 2) и (3, 4) показало, что увеличение скорости ударника увеличило силу контакта, а его продолжи-

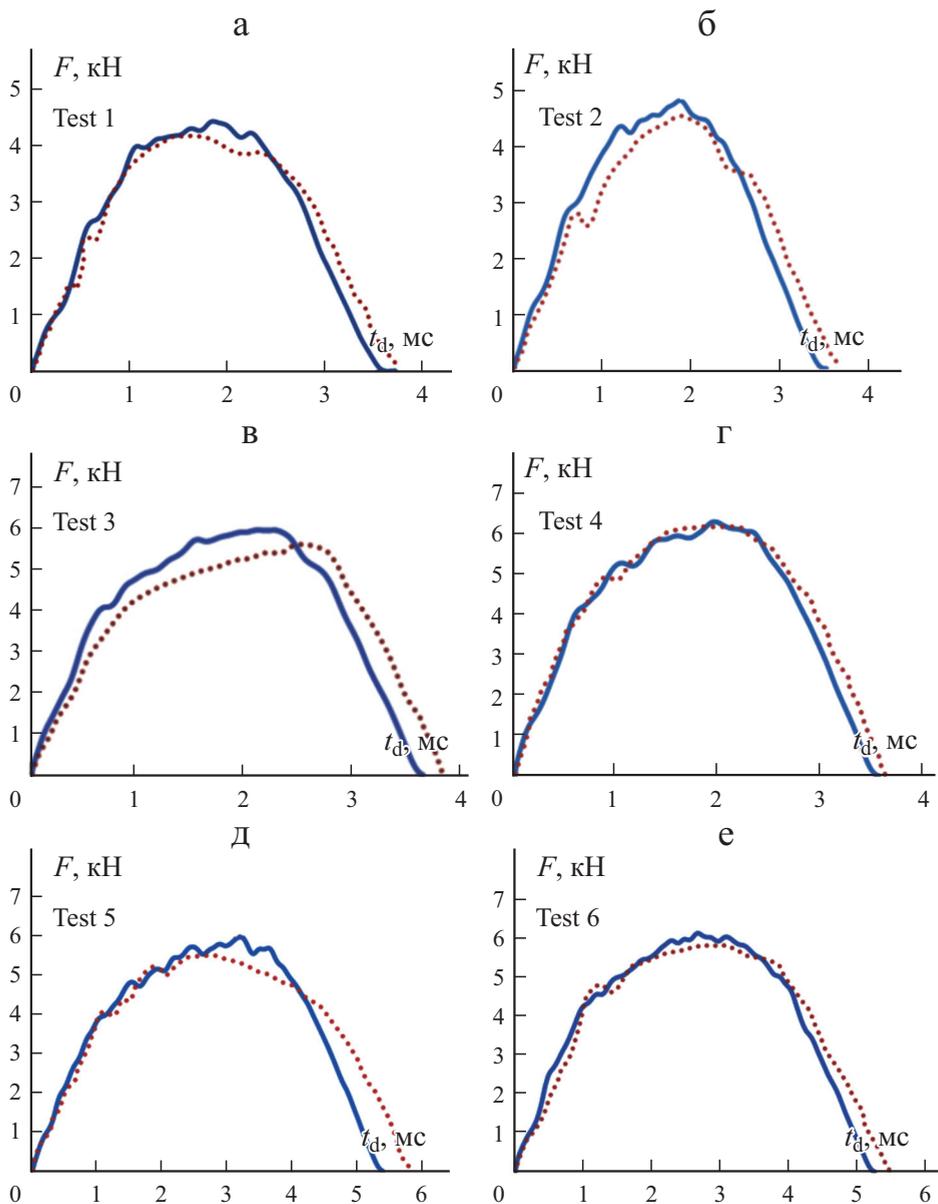


Рис. 9. Сравнение численных (—) и экспериментальных (···) зависимостей контактной силы F от продолжительности контакта t_d в испытаниях 1—6 с разными условиями удара (см. табл. 1).

тельность практически не изменяло. Сравнение результатов испытаний (1, 2) и (5, 6) показало, что с увеличением массы ударника возросла сила и продолжительность контакта.

Диаграммы численных значений максимальных остаточных поперечных перемещений наружной и задней поверхностей приведены на рис. 10. Сравнение результатов, полученных для парных испытаний (1, 2), с испы-

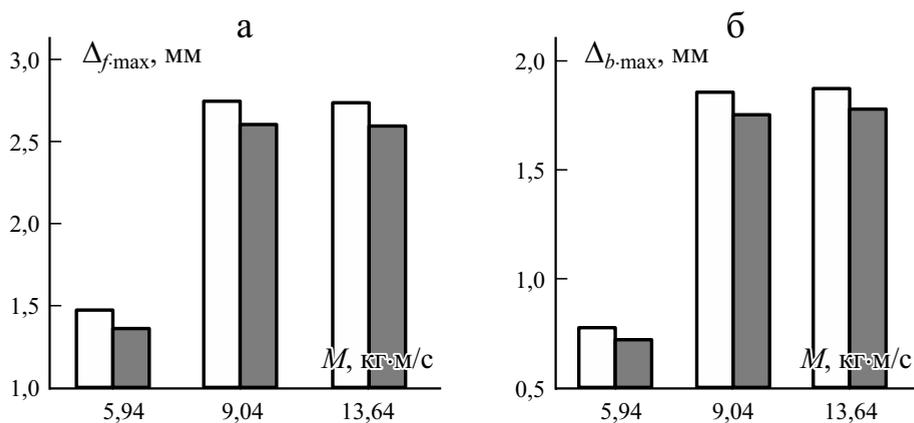


Рис. 10. Диаграммы постоянного поперечного перемещения наружной (а) и задней (б) поверхностей сэндвич-пластин с сердцевиной из чистого (□) и наноармированного (■) полипропилена при разном ударном импульсе M .

таниями (3, 4) и (5, 6) показало, что поперечное перемещение возрастало с увеличением скорости или массы ударника. Значения максимальных поперечных перемещений в испытании 2 меньше, чем в испытании 1. Это означает, что поперечное перемещение уменьшилось за счет введения частиц графена в сердцевину сэндвич-конструкции.

Введение графена в ПП изменяло его механические свойства, в том числе предел текучести и модуль упругости. Поэтому мощность удара варьировали путем изменения свойств материала, в том числе предела текучести и модуля упругости. Увеличение предела текучести или модуля упругости полипропиленовой сердцевины уменьшало поперечное перемещение сэндвич-конструкции, продолжительность контакта и пластический радиус, что увеличивало остаточную кинетическую энергию ударника. Зависимость контактной силы от поперечного перемещения обратная. Чем меньше деформация в поперечном направлении, тем меньше площадь контакта с ударником и тем больше контактное усилие.

2.8. Влияние разных механических и геометрических свойств на ударное поведение сэндвич-конструкций. После проверки достоверности конечно-элементной модели изучили влияние разных параметров, включая толщину слоев АЛ и ПП, разное массовое содержание наночастиц графена и разные механические свойства слоев АЛ.

Рассмотрены три типа мишени-конструкции с разной толщиной слоев АЛ и ПП. В мишени-конструкции типа 1 толщина обоих лицевых слоев АЛ и слоя сердечника из ПП равна 1 мм; в мишени типа 2 толщина сердечника 2 мм, а слоев АЛ — 1 мм; в мишени типа 3 толщина слоев АЛ равна 2 мм, а сердцевины — 1 мм. Масса и скорость жесткого ударника равны таковым в испытаниях 5 и 6 (см. табл. 1).

Табл. 5

Влияние параметров материала слоев AL на максимальное постоянное поперечное перемещение передней (ППП) и задней (ПЗП) поверхностей, пластического радиуса (ПР), остаточной кинетической энергии ударника (ОКЭ), контактной силы (КС) и продолжительности контакта (ПК) сэндвич-конструкций типа 1

Свойства AL	ППП	ПЗП	ПР	ОКЭ, Дж	КС, кН	ПК, мс
	мм					
(E, σ_y, ρ)	4,528	3,936	13,81	3,622	4,19	7,313
$(1,3E, \sigma_y, \rho)$	4,218	3,622	12,62	4,157	4,25	6,955
$(1,6E, \sigma_y, \rho)$	4,102	3,503	8,86	4,439	4,33	6,795
$(1,9E, \sigma_y, \rho)$	3,968	3,337	6,74	4,720	4,54	6,595
$(E, 1,3\sigma_y, \rho)$	3,909	3,327	11,11	4,664	4,60	7,073
$(E, 1,6\sigma_y, \rho)$	3,448	2,893	7,38	5,447	4,90	6,954
$(E, 1,9\sigma_y, \rho)$	3,079	2,593	4,41	6,073	5,14	6,834
$(E, \sigma_y, 1,3\rho)$	4,529	3,881	13,83	3,614	4,19	7,253
$(E, \sigma_y, 1,6\rho)$	4,548	3,924	13,85	3,593	4,19	7,253
$(E, \sigma_y, 1,9\rho)$	4,528	3,849	13,84	3,583	4,17	7,311

Для изучения влияния характеристик материала, включая модуль упругости, предел текучести и плотность на ударный отклик мишеней-кон-

Табл. 6

Влияние массового содержания наночастиц и толщины слоев AL и ПП на ППП, ПЗП, ОКЭ, КС и ПК (см. табл. 5) сэндвич-конструкций с сердцевиной из чистого и nanoармированного полипропилена

Мишень	ППП	ПЗП	ПР	ОКЭ, Дж	КС, кН	ПК, мс
	мм					
Тип 1 — ПП	4,528	3,936	13,81	3,622	4,19	7,313
Тип 1 — ПП/0,5% Г	4,511	3,901	13,25	3,654	4,29	7,270
Тип 1 — ПП/1% Г	4,529	3,934	13,65	3,632	4,19	7,302
Тип 1 — ПП/2% Г	4,549	3,945	13,75	3,645	4,15	7,314
Тип 2 — ПП	3,653	2,959	12,31	4,254	4,73	6,595
Тип 2 — ПП/0,5% Г	3,574	2,893	11,42	4,286	4,79	6,465
Тип 2 — ПП/1% Г	3,622	2,926	12,15	4,248	4,69	6,534
Тип 2 — ПП/2% Г	3,632	2,944	12,25	4,221	4,65	6,604
Тип 3 — ПП	2,445	1,643	16,30	4,830	7,15	4,916
Тип 3 — ПП/0,5% Г	2,434	1,625	16,01	4,893	7,22	4,856
Тип 3 — ПП/1% Г	2,442	1,635	16,15	4,836	7,14	4,916
Тип 3 — ПП/2% Г	2,445	1,639	16,25	4,831	7,09	4,917

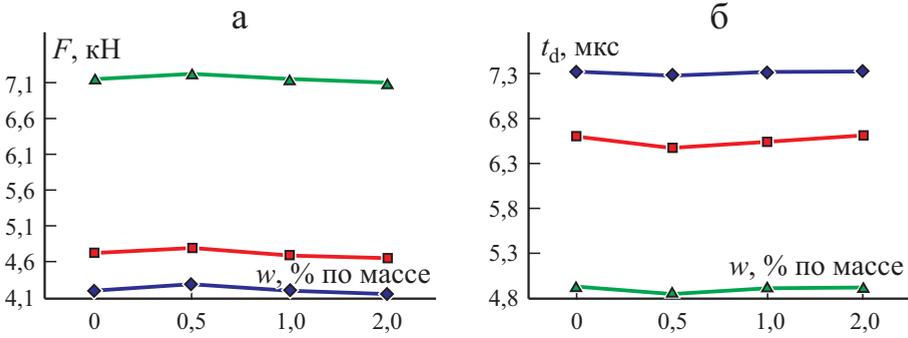


Рис. 11. Влияние массового содержания w графена на контактную силу F (а) и продолжительность контакта t_d (б) сандвич-пластин типа 1 (\diamond), 2 (\blacksquare), 3 (\blacktriangle).

струкций провели численное исследование. Характеристики материала изменяли одновременно. На каждом этапе изменяли одну характеристику с целью определения степени её влияния. Результаты влияния характеристик материала для мишени-конструкции типа 1 представлены в табл. 5. Видно, что увеличение модуля упругости и предела текучести уменьшало поперечные перемещения наружной и задней поверхностей, сделав поведение сандвич-мишени более жестким и уменьшив остаточную кинетическую энергию. Влияние плотности на отклик при ударе было незначительным.

Влияние толщины слоев АЛ и ПП и разного массового содержания наночастиц иллюстрируют результаты, приведенные в табл. 6. Видно, что увеличение толщины слоев АЛ или ПП увеличивает силу контакта, но уменьшает его продолжительность и поперечное перемещение. Влияние разного массового содержания наночастиц иллюстрируют данные табл. 6 и рис. 11. Анализ результатов свидетельствует о том, что оптимальным является введение в сердцевину ПП 0,5% по массе графеновых пластинок, обеспечивающее экстремальные значения (минимальные или максимальные) всех ударных характеристик сандвич-мишени. Введение большего количества нанопластинок (1 или 2% по массе) не улучшило ударные характеристики (см. данные табл. 6. и рис. 11).

Заключение

Для экспериментальных испытаний изготовили сандвич-конструкции с алюминиевыми лицевыми слоями и сердцевиной из чистого полипропилена и армированного 0,5% по массе пластинками графена. Исследовали влияние материала сердцевины, массы и скорости ударника на отклик сандвич-пластин при низкоскоростном ударе. При одинаковой величине импульса ударника добавление наночастиц в сердцевину ПП продемонстрировало увеличение контактной силы и остаточной кинетической

энергии ударника, но уменьшило другие характеристики, в том числе продолжительность контакта, глубину вмятины, максимальное остаточное поперечное перемещение задней поверхности, площадь повреждения. Увеличение массы ударника увеличило все ударные характеристики, также как и увеличение скорости ударника, которая не оказывала существенного влияния только на продолжительность контакта.

Для дальнейшего исследования ударного отклика сэндвич-конструкций разработали и реализовали в программном обеспечении ABAQUS трехмерную конечно-элементную модель четверти сэндвич-конструкции. Для моделирования низкоскоростного ударного поведения слоев ПП/Г использовали модель материала Джонсона—Кука и микромеханическую модель, зависящую от скорости деформации. Установили, что результаты МКЭ очень хорошо согласуются с экспериментальными. Принимая во внимание результаты настоящего исследования, можно констатировать, что предложенная модель с параметрами Джонсона—Кука достаточно надежна для моделирования низкоскоростного ударного поведения нанокompозитов полипропилен/графен.

После проверки достоверности конечно-элементной модели оценили влияние разных параметров, включая толщину слоев AL и ПП, массовое содержание наночастиц и механических свойств слоев AL. Разных значений предела текучести и модуля упругости материала сердцевины достигли за счет введения в него разного количества графена: 0,5, 1 и 2% по массе. Предел текучести и модуль упругости слоев AL и ПП значительно повлияли на ударные характеристики сэндвич-конструкции, включая контактную силу, продолжительность контакта, остаточную кинетическую энергию ударника, пластический радиус и поперечные перемещения. Все ударные характеристики сэндвич-конструкции достигали экстремальных (минимальных или максимальных) значений, включая минимальную площадь повреждения, при оптимальном содержании нанопластинок графена 0,5% по массе. Добавление большего количества графена не улучшило их отклик при ударе. Минимальное количество площади повреждения и поперечного перемещения имело место в сэндвич-конструкциях с сердцевиной ПП/0,5% Г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Altan M., Bayraktar M., and Yavuz B. Manufacturing polymer/metal macro-composite structure for vibration damping // Int. J. Adv. Manuf. Tech. — 2016. — Vol. 86. — P. 2119—2126.
2. Khoramishad H. and Bagheri Tofighi M. Effects of mechanical and geometrical properties of adhesive and metal layers on low-velocity impact behavior of metal laminate structures // J. Adhes. Sci. Technol. — 2015. — Vol. 29. — P. 592—608.
3. Khoramishad H., Bagheri Tofighi M., and Khodaei M. Effect of stacking sequence on low-velocity impact behavior of metal laminates // Phys. Mesomech. — 2018. — Vol. 21. — P. 140—149.

4. *Riccio A., Raimondo A., Sellitto A., Acanfora V., and Zarrelli M.* Multifunctional polypropylene core for aerospace sandwich composite panels // *Procedia Eng.* — 2016. — Vol. 167. — P. 64—70.
5. *Bulut M.* Low-velocity impact tests on basalt fiber/polypropylene core honeycomb sandwich composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2020. — Vol. 56. — P. 121—130.
6. *Hosur M. V., Mohammed A. A., and Jeelani S.* Impact response of nanophased polyurethane foam core sandwich composites // *Proc. 16th Int. Conf. Compos. Mater. (ICCM—16)*, Kyoto, 8—13 July, 1—7, 2007.
7. *Hosur M. V., Mohammed A. A., Zainuddin S., and Jeelani S.* Processing of nanoclay filled sandwich composites and their response to low-velocity impact loading // *Compos. Struct.* — 2008. — Vol. 82. — P. 101—116.
8. *Hosur M. V., Mohammed A. A., Zainuddin S., and Jeelani S.* Impact performance of nanophased foam core sandwich composites // *Mater. Sci. Eng.* — 2008. — Vol. 498. — P. 100—109.
9. *Bhuiyan M. A., Hosur M. V., and Jeelani S.* Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial ($\pm 45^\circ$) braided face sheets // *Composites: Part B.* — 2009. — Vol. 40. — P. 561—571.
10. *Avila A. F., Carvalho M. G. R., Dias E. C., and Cruz D. T. L.* Nano-structured sandwich composites response to low-velocity impact // *Compos. Struct.* — 2010. — Vol. 92. — P. 745—751.
11. *Reis P. N. B., Santos P., Ferreira J. A. M., and Richardson M. O. W.* Impact response of sandwich composites with nano-enhanced epoxy resin // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2013. — Vol. 32. — P. 898—906.
12. *Taraghi I. and Fereidoon A.* Non-destructive evaluation of damage modes in nanocomposite foam-core sandwich panel subjected to low-velocity impact // *Composites: Part B.* — 2016. — Vol. 103. — P. 51—59.
13. *Ramakrishnan K. R., Guerard S., Zhang Z., Shankar K., and Viot P.* Numerical modeling of foam-core sandwich panels with nano-reinforced composite facesheets // *J. Sandw. Struct. Mater.* — 2019. — Vol. 1. — P. 1—26.
14. *Feli S. and Jalilian M. M.* Three dimensional solution of low velocity impact on sandwich panels with hybrid nanocomposite face sheets // *Mech. Adv. Mater. Struct.* — 2018. — Vol. 25. — P. 579—591.
15. *Salami S. Jedari.* Low velocity impact response of sandwich beams with soft cores and carbon nanotube reinforced face sheets based on extended high order sandwich panel theory // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2017. — Vol. 66. — P. 165—176.
16. *Vakili-Tahami F., Adibeig M. R., and Hassanifard S.* Optimizing creep lifetime of friction stir welded PMMA pipes subjected to combined loadings using rheological model // *Polym. Test.* — 2019. — Vol. 79. — P. 106049.
17. *Ku J. H., Jung I. H., Rhee K. Y., and Park S. J.* Atmospheric pressure plasma treatment of polypropylene to improve the bonding strength of polypropylene/aluminum composites // *Composites: Part B.* — 2013. — Vol. 45. — P. 1282—1287.
18. *Shokrieh M. M. and Joneidi V. Ahmadi* Characterization and simulation of impact behavior of graphene/polypropylene nanocomposites using a novel strain rate-dependent micromechanics model // *J. Compos. Mater.* — 2014. — Vol. 49. — P. 2317—2328.
19. *Pocius A. V.* The electrochemistry of the FPL (Forest Products Laboratory) process and its relationship to the durability of structural adhesive bonds // *J. Adhes.* — 1992. — Vol. 39. — P. 101—121.
20. URL: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html> (reference date: 06.12.2021)

21. *Goldberg R. K., Roberts G. D., and Gilat A.* Implementation of an associative flow rule including hydrostatic stress effects into the high strain rate deformation analysis of polymer matrix composites // *J. Aerospace Eng.* — 2005. — Vol. 18. — P. 18—27.

22. *Shokrieh M. M., Mosalmani R., and Omid M. J.* Strain rate dependent micro-mechanical modeling of reinforced polymers with carbon nanotubes // *J. Compos. Mater.* — 2013. — Vol. 48. — P. 3381—3393.

23. *Geiglou Z. Emami and Chakherlou T. N.* Numerical and experimental investigation of the effect of the cold expansion process on the fatigue behavior of hybrid (bonded-bolted) double shear lap aluminum joints // *Int. J. Fatigue.* — 2019. — Vol. 126. — P. 30—43.

Поступила в редакцию 14.04.2021

Окончательный вариант поступил 08.11.2021

Received Apr. 14, 2021 (Nov. 8, 2021)
