

*М. Э. Голмакани^а, Т. Виченбах^б, М. Маликан^б, Э. З. Карими^в, М. Масуми^а,
В. А. Еремеев^{б,г*}*

^а*Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, 9187144123
Mashhad, Iran*

^б*Department of Mechanics of Materials and Structures, Gdansk University of Technology, 80-233
Gdansk, Poland*

^в*Department of Metallurgical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University,
9187144123 Mashhad, Iran*

^г*Department of Civil and Environmental Engineering and Architecture, Università degli Studi
di Cagliari, 09123 Cagliari, Italy*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И СТЕКЛОВОЛОКОН¹

*M. E. Golmakani, T. Wiczenbach, M. Malikan, E. Z. Karimi, M. Masoumi, and
V. A. Eremeyev**

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ALUMINUM/GLASS FIBER COMPOSITE LAMINATES

Keywords: fiber-metal composites; tensile test; impact test; mechanical properties; impact strength; laminates

The fiber-metal composites made of aluminum sheets and glass fibers reinforced with a polyester resin as the matrix were studied. The composites were prepared by hand lay-up method. Some aspects of manufacturing affecting the composite behavior were considered. In particular, the influences of the arrangement of layers and their number on the mechanical and physical properties of composites with ten different compositions were investigated. Laminates with fiberglass fabric with different mass per unit area were considered. The laminates with ten different compositions were produced. The tensile modulus, tensile and impact strengths were determined following ASTM D3039 and ASTM D6110 standards. The results obtained show that the arrangement of the laminate layers influences

*Автор, с которым следует вести переписку: eremeyev.victor@gmail.com
Corresponding author: eremeyev.victor@gmail.com

¹Перевод с англ.

Young's modulus and the tensile strength of the composite. The results of impact testing of a multilayer structure reinforced with glass fibers demonstrated a significant increase in the impact strength of the composite owing to the introducing the glass fibers into it compared to the control specimens. The simulations of tests using ABAQUS-based FEA were performed.

Ключевые слова: композиты металловолокнистые, испытание на растяжение, испытание на удар, свойства механические, прочность при ударе, композиты слоистые

Исследованы металловолокнистые композиты, армированные алюминиевыми листами и слоями стеклоткани, с полиэфирной смолой в качестве матрицы. Композиты изготовлены методом ручной выкладки. Проанализировано влияние расположения слоев и их количества на механические и физические свойства композитов 10 разных композиций. Рассмотрены композиты со слоями стеклоткани с разной поверхностной плотностью. Модуль упругости и прочность при растяжении и ударную прочность определили в соответствии со стандартами ASTM D3039 и ASTM D6110. Полученные результаты показали, что последовательность укладки слоев влияет на модуль Юнга и прочность композита. Результаты ударных испытаний многослойной структуры, армированной стекловолокнами, продемонстрировали значительное увеличение ударной прочности композита при введении в него слоев из стекловолокон по сравнению с контрольными образцами. Выполнено моделирование испытаний с использованием метода конечных элементов (МКЭ) с помощью программного обеспечения ABAQUS.

Введение

Композиты на основе полимеров обладают высокой прочностью, усталостной, тепло-, влаго- и химической стойкостью [1, 2]. Однако эти композиты обычно характеризуются низкой рабочей температурой, высоким коэффициентом термического расширения, нестабильностью размеров, чувствительностью к радиации и водопоглощению из окружающей среды. Эти недостатки обуславливают набухание, внутренние напряжения и снижение температуры эксплуатации [3]. Поэтому для ослабления этих нежелательных свойств наряду с композитными слоями используют высокоэффективные и прочные металлические слои [4, 5]. Такие слоистые композиты получили название металловолокнистых композитов (МВК) [6—9].

Один из таких современных композитов — эпоксидная смола, армированная стекловолокнами и слоями алюминия (GLARE). Несколько тонких слоев металла (чаще всего алюминия), чередующихся со слоями стеклово-

локон, соединяют с помощью полимерной матрицы. Многослойные МВК широко используют для изготовления деталей механических конструкций в разных отраслях промышленности, особенно в аэрокосмической [10, 11], они стали перспективной альтернативой другим композитам. МВК обладают почти всеми преимуществами металлов и слоистых композитов, сочетая полезные свойства металлов (мягкость, устойчивость к повреждениям и ударопрочность) с достоинствами волокнистых композитов (высокая прочность и жесткость, хорошая коррозионная стойкость и усталостные свойства).

В силу большого интереса к этим композитам опубликовано много интересных работ. В [12] исследовали влияние поглощения энергии на свойства эпоксидных волокнисто-армированных углепластиков, упрочненных листами алюминия и без упрочнения, при ударе. Образцы подвергали удару по Шарпи. Результаты показали, что волокнисто-армированные углепластики с листами алюминия обладают значительно лучшей ударной прочностью. В [13] изучали образцы из эпоксидного стеклопластика с алюминиевыми листами, изготовленными методом ручной выкладки. Исследовали влияние угла ориентации волокон на ударопрочность. Результаты испытаний удара по Шарпи продемонстрировали, что композитный слой с волокнами, уложенными под углом 0° , значительно улучшает ударные свойства.

Последовательность укладки слоев также весьма важна. Можно сделать вывод о том, что наличие алюминиевых слоев улучшает механические свойства композита. В [14] изучали ударную прочность слоев алюминия и стеклопластика. Результаты продемонстрировали устойчивость к повреждениям, отличные усталостные и ударные свойства при относительно низкой плотности. Механические свойства МВК, армированных стекловолокнами и включающих слои из алюминия и полипропилена, исследовали в [15]. Результаты испытаний на растяжение показали, что увеличение количества алюминиевых и композитных слоев значительно повышает жесткость и прочность при растяжении.

В [16] изучали сдвиговую усталость коротких балок из металловолокнистых многослойных материалов. Для изготовления образцов использовали три слоя из алюминиевого сплава и два — из предварительно пропитанных стекловолокон. Для исследования усталостных характеристик многослойных металловолокнистых материалов квазистатические испытания провели в двух основных направлениях. Удар по Шарпи показал, что ударная прочность в продольном направлении более важна, чем в поперечном. В [17] рассмотрели отклик слоистых металловолокнистых структур при усталостном и растягивающем нагружении, в том числе при наличии алюминиевых и органических волокон. Отклик на изгиб и растяжение гибридных композитов, армированных стекловолокнами и алюминием, изготовленных методом вакуумного формования, исследовали в [18]. В [19] изучали разрушение и изгибное поведение полимерных композитов, армированных углеродными волокнами и алюминием, используя численные и

экспериментальные результаты. В [20] численно смоделировали слоистые металловолоконистые композиты, армированные волокнами из алюминия и высокомолекулярного полиэтилена, при ударном нагружении. Механические свойства слоистых металловолоконистых композитов на основе волокон АА6061 с разным типом предварительной обработки алюминиевой поверхности исследовали в [21]. В [22] смоделировали металловолоконистый слоистый композит с использованием разных алюминиевых сплавов и рассматривали его поведение в условиях малоимпульсного взрыва. В [23] смоделировали слоистый композит, армированный алюминием и стекловолокнами, и исследовали его энергопоглощение и поведение при повреждении. Отклик алюминиевых слоистых композитов, армированных стекловолокнами, на ударную нагрузку снарядом изучали в [24] и оценили влияние распределения металлических слоев. В [25] изучен слоистый композит, армированный алюминиевыми волокнами, при изгибе и растяжении.

Пластмассы, хотя и не обладают значительной прочностью в силу малого модуля при растяжении, нашли широкое применение. Основные преимущества пластмасс — их использование в условиях высокой влажности и малая плотность. Напротив, стекловолокна в качестве армирующего материала демонстрируют значительную прочность при растяжении и модуль упругости, композиты на их основе нашли применение во многих областях техники. Механические и физические свойства композитных материалов различны в зависимости от содержания конкретных составляющих.

Алюминий обладает малой удельной прочностью. Исследователи, пытающиеся исправить этот недостаток, решили использовать слои алюминия и стекловолокон вместе для создания нового материала, обладающего достоинствами обоих материалов. Был изготовлен материал GLARE, введенный в промышленную эксплуатацию и используемый в авиационной промышленности [26]. За счет добавления металлических листов нашли передовые решения по упрочнению композитных материалов. Дополнительное армирование влияет на механические и физические свойства конечного продукта. Провели испытания металловолоконистых многослойных композитов на удар и растяжение.

Новизна настоящей работы — новая компоновка GLARE, позволяющая создать композит с улучшенными механическими свойствами. Полученные результаты сравнили с полученными для контрольных образцов, армированных только алюминиевыми слоями. Основная цель настоящей работы — исследование механических и физических свойств МВК с разным количеством слоев алюминия и стеклопластика. Для проверки экспериментальных результатов выполнили численный анализ МКЭ. Определили ударную прочность МВК, содержащих разные слои. Настоящее исследование может способствовать разработке изделий из МВК с учетом улучшения их физико-механических свойств.

1. Материалы

Для изготовления образцов металловолоконистых композитов в качестве арматуры использовали ткань из E-стекловолокон, алюминиевые листы и полиэфирное связующее в качестве матрицы.

Толщина каждого слоя стеклоткани 0,2 и 0,4 мм, масса 200 и 400 г/м² соответственно; технические характеристики следующие: модуль Юнга $E = 74$ ГПа, модуль сдвига $G = 30$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 2600$ кг/м³. В качестве второй арматуры использовали алюминиевые листы толщиной 0,2 мм (рис. 1) со следующими характеристиками: $E = 72$ ГПа, $G = 100$ —190 ГПа, $\nu = 0,33$, $\rho = 2600$ кг/м³. Характеристики полиэфирной смолы: $E = 0,8$ ГПа, $G = 0,28$ ГПа, $\nu = 0,4$, $\rho = 1200$ кг/м³.

1.1. Изготовление образцов металловолоконистых композитов.

Образцы слоистых композитов изготовили методом ручной выкладки, предварительно обработав поверхность формы антиадгезивом. Затем на поверхность формы нанесли гелевое покрытие для обеспечения желаемого качества и внешнего вида композита. Слои стеклоткани и алюминия укладывали попеременно в форму, покрывая каждый слой полиэфирной смолой. Частицы воздуха удаляли вручную с помощью роликов. Укладку и пропитку продолжали до достижения требуемой конфигурации слоистого композита. Заготовку слоистого композита сначала отверждали на стеклянном столе при температуре окружающей среды в течение 24 ч, а затем доотверждали в печи в течение 16 ч при температуре 40 °С. По завершении отверждения слоистый композит охладили до комнатной температуры, промыли и перед испытанием удалили заусенцы. Образцы слоистого композита с теми размерами, которые требуются для испытаний на растяжение и удар (рис. 2), изготовили с помощью фрезерного станка (Aslanian Machine, Тегеран, Иран) в соответствии со стандартами ASTM D3039 и ASTM D6110.

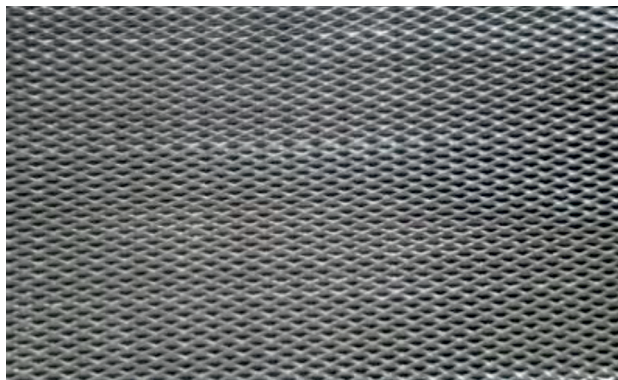


Рис. 1. Алюминиевый лист.

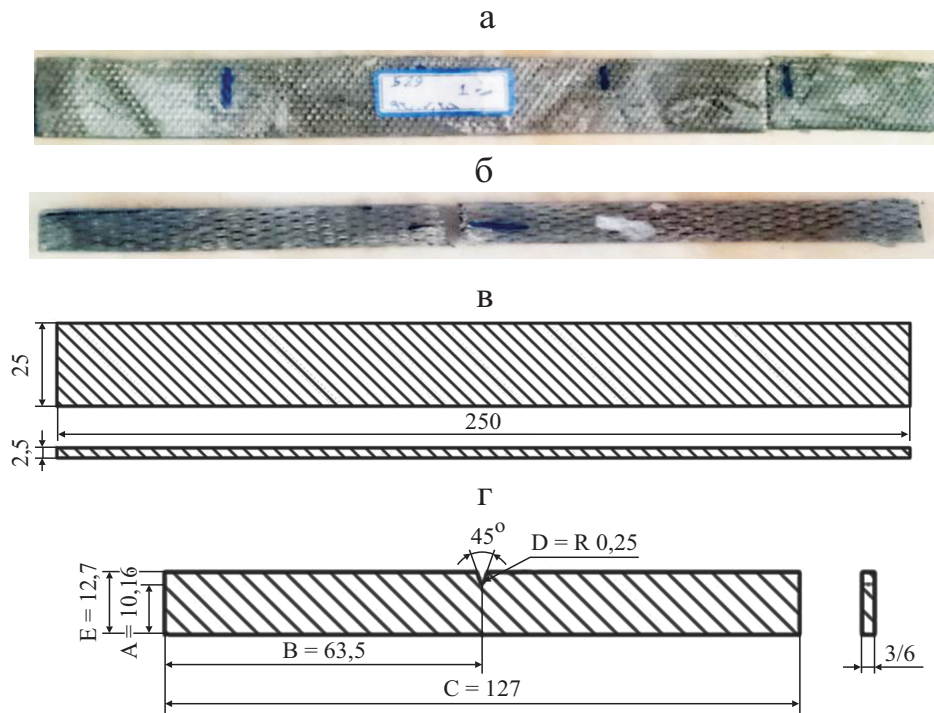


Рис. 2. Образцы для испытания на растяжение (а, в) и удар (б, з) и их геометрия (мм).

Табл. 1

Характеристики образцов

Образец	Последовательность укладки	Количество слоев	Код образца	Толщина, мм
1	[AL/FI/AL/FI/AL/FI] ¹	6	L200-6-1-ТТ	2,5
2	[AL/FI/AL/FI/AL/FI] ²	6	L400-6-2-ТТ	2,5
3	[2AL/FI/AL/2FI] ¹	6	L200-6-3-ТТ	2,5
4	[2AL/FI/AL/2FI] ²	6	L400-6-4-ТТ	2,5
5	[3AL]	3	С-3-ТТ	2,5
6	[AL/FI/AL/FI/AL/FI] ¹	6	L200-6-1-ИТ	3
7	[AL/FI/AL/FI/AL/FI] ²	6	L400-6-2-ИТ	3
8	[2AL/FI/AL/2FI] ¹	6	L200-6-3-ИТ	3
9	[2AL/FI/AL/2FI] ²	6	L400-6-4-ИТ	3
10	[3AL]	3	С-3-ИТ	3
11	[AL/FI/AL/FI/AL/FI/AL/FI/AL/FI/AL/FI] ¹	12	L200-12-1-ИТ	6
12	[AL/FI/AL/FI/AL/FI/AL/FI/AL/FI/AL/FI/AL/FI] ²	12	L400-12-2-ИТ	6
13	[3AL/FI/2AL/2FI/AL/3FI] ¹	12	L200-12-3-ИТ	6
14	[3AL/FI/2AL/2FI/AL/3FI] ²	12	L400-12-4-ИТ	6
15	[6AL]	6	С-6-ИТ	6

^{1,2}Поверхностная плотность стекловолокна 200 и 400 г/м² соответственно.

В табл. 1 приведены характеристики образцов: последовательность укладки слоев алюминия (AL) и стеклоткани (FI), код образца (ТТ – испытание на растяжение, ИТ – испытание на удар). Отметим, что контрольные образцы изготовили только из слоев алюминия и полиэфирной смолы. Количество слоев выбрали произвольно.

1.2. Механическое испытание. В соответствии со стандартами ASTM D3039 и ASTM D6110 испытания на растяжение и удар по Шарпи провели при комнатной температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$ на экспериментальной машине Instron 1186 (Норвуд, Массачусетс, США) и установке на удар Zwick Model 5102 (Zwick GmbH & Co. KG), Ульм, Германия) соответственно. Испытания на растяжение выполнили с датчиком нагрузки 500 Н и постоянной скоростью перемещения траверсы 2 мм/мин на не менее пяти образцах каждой из пяти композиций (см. табл. 1). Построили кривые деформирования сила—перемещение и определили средние значения модуля упругости и прочности при растяжении. Ударную прочность определили в ударном испытании по Шарпи для образцов 10 разных композиций.

1.3. Численный анализ. **1.3.1. Испытание на растяжение.** Для определения предельного продольного перемещения образцов металловолоконистого слоистого композита их испытание на одноосное растяжение смоделировали с помощью конечно-элементного программного обеспечения ABAQUS версии 6.14.1 (Dassault Systemes, ABAQUS Inc., Уолтем, Массачусетс, США). Тип образца — деформируемый.

Материал считали изотропным и для определения его свойств в упругой области использовали значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, приведенные в табл. 2. Затем рассматривали пластическое механическое поведение. Значения деформаций и напряжений, полученные в ходе испытаний на растяжение, преобразовали в значения истинных напряжений и деформаций по формулам

$$\sigma_T = \sigma_N (1 + \varepsilon_N), \quad (1)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_N), \quad (2)$$

Табл. 2

Свойства материала образцов

Образец	Код образца	σ_y , МПа	σ_{num} , МПа	ε_p	E , МПа
1	L200-6-1-ТТ	1,14	63,82	3,80	1548,46
2	L400-6-2-ТТ	1,15	62,65	4,15	1875,10
3	L200-6-3-ТТ	1,76	67,88	3,74	996,90
4	L400-6-4-ТТ	1,78	59,59	4,17	1163,17
5	C-3-ТТ	1,64	4,76	0,58	753,20

Примечание: Для всех образцов $\nu = 0,33$.

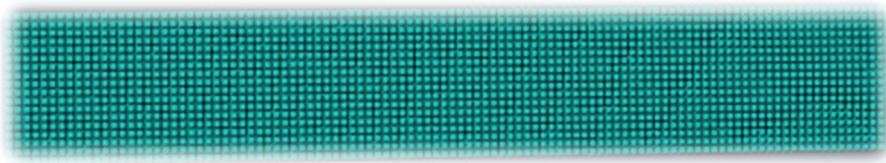


Рис. 3. Образец с конечно-элементной сеткой для численного анализа.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_N - \frac{\sigma_T}{E}, \quad (3)$$

где σ_T и ε_T — истинное напряжение и деформация соответственно; ε_N — техническая деформация (из испытания на растяжение); ε_p — пластическая деформация.

Перемещения конца образца, закрепленного в захвате, приняты нулевыми. Противоположная сторона образца могла перемещаться в направлении нейтральной оси. После проведения анализа чувствительности выбрали сетку с размером конечных элементов 1 мм (рис. 3). Численный анализ МКЭ выполнили с помощью программного обеспечения ABAQUS.

1.3.2. Ударное испытание. Конечно-элементная модель ударного испытания образца представлена на рис. 4. Свойство дискретной жесткости использовали для моделирования ударника как идеально жесткого тела при столкновении с образцом. Контакт поверхностей образца и ударника определили как взаимодействие поверхность—поверхность. Рассмотрели взаимосвязь давления и поверхности раздела, соответствующую данному типу контакта. Скорость ударника — 2,5 мм/с согласно стандарту испытания на удар. В соответствии с установкой для испытания на удар граничные условия соответствовали неподвижной нижней стороне образца. После теста на чувствительность выбрали сетку с размером конечных элементов 1 мм.

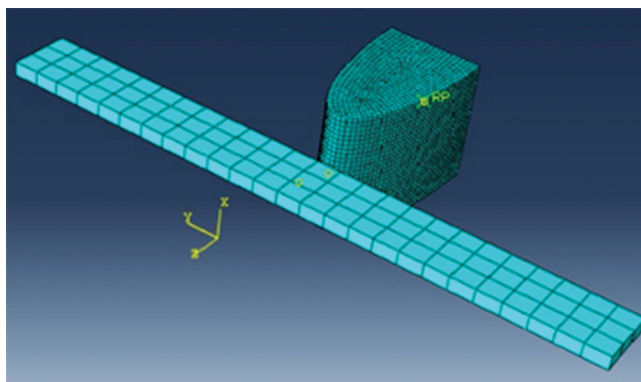


Рис. 4. Конечно-элементная модель образца для численного испытания на удар.

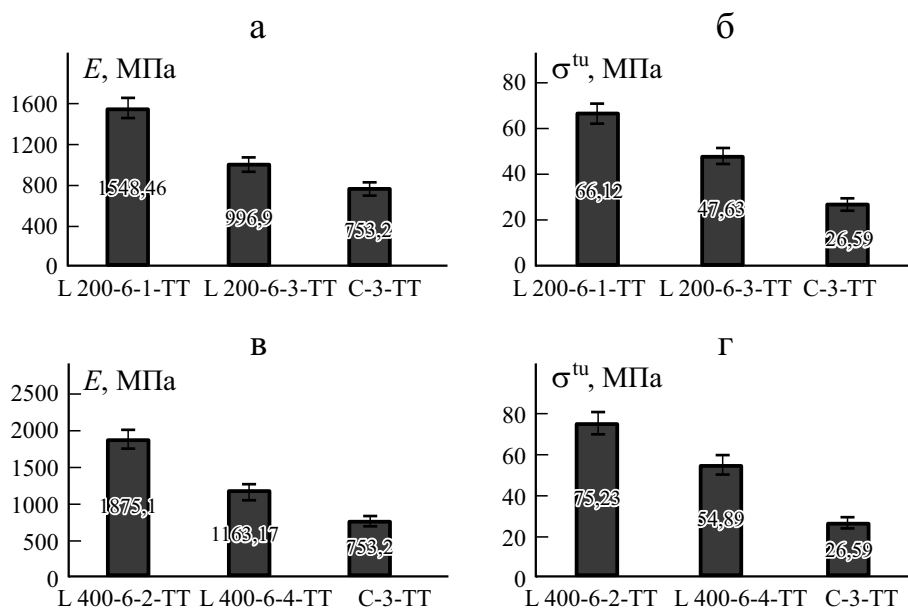


Рис. 5. Модуль упругости E (а, в) и прочность при растяжении σ^{tu} (б, г) МВК, содержащих слои стеклоткани с поверхностной плотностью 200 (а, б) и 400 г/м² (в, г).

2. Результаты

2.1. Экспериментальный анализ. 2.1.1. Испытание на растяжение. Данные рис. 5—а, б иллюстрируют значения модуля Юнга E и прочности при растяжении σ^{tu} МВК, содержащих слои стеклоткани с поверхностной плотностью 200 г/м², и контрольного образца С-3-ТТ. Стандартное отклонение показано черными линиями. Видно, что добавление слоев со стекловолокнами значительно увеличило модуль Юнга МВК. Наибольшую прочность при растяжении продемонстрировал многослойный композит L200-6-1-ТТ.

Значения E и σ^{tu} МВК, содержащих слои стеклоткани с поверхностной плотностью 400 г/м², и контрольного образца приведены на рис. 5—в, г. Видно, что модуль Юнга многослойного образца L400-6-2-ТТ больше,

Табл. 3

Значения модуля Юнга E и прочности при растяжении σ^{tu} образцов

Образец	Код образца	E , МПа	σ^{tu} , МПа
1	L200-6-1-ТТ	1548,46	66,12
2	L400-6-2-ТТ	1875,10	75,23
3	L200-6-3-ТТ	996,90	47,63
4	L400-6-4-ТТ	1163,17	54,89
5	С-3-ТТ	753,20	26,59

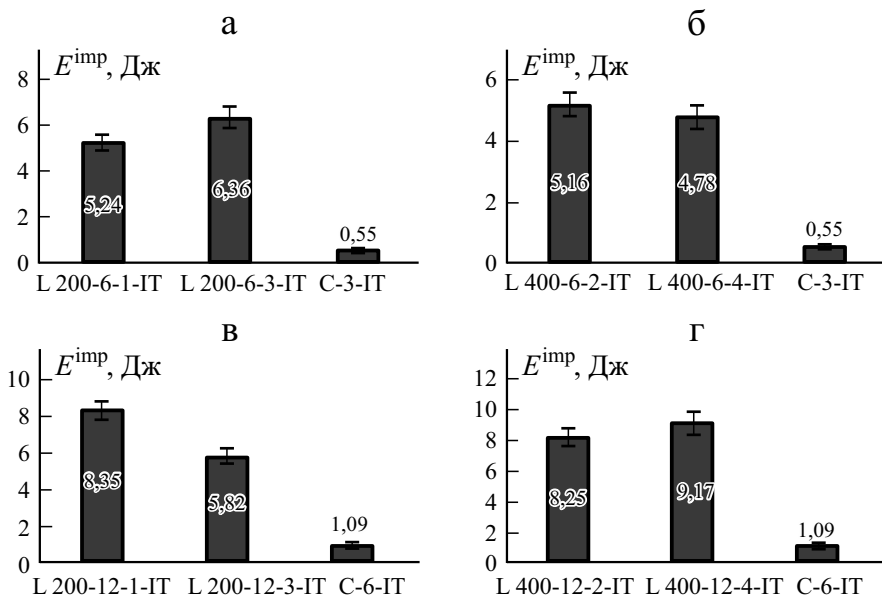


Рис. 6. Диаграммы энергии удара E^{imp} для слоистых композитов с шестью (а, б) и 12 (в, г) слоями, содержащие стеклоткань с поверхностной плотностью 200 (а, в) и 400 г/м² (б, г).

чем остальных. Значения σ^{tu} при растяжении образцов L400-6-4-ТТ и L400-6-2-ТТ примерно в три раза больше, чем контрольного образца С-3-ТТ.

Экспериментальные значения модуля упругости и прочности при растяжении приведены в табл. 3.

Табл. 4

Значения энергии удара E^{imp} и ударной прочности σ^{imp} образцов МВК

Образец	Код образца	E^{imp} , Дж	σ^{imp} , кДж/м ²
6	L200-6-1-IT	5,24	164,78
7	L400-6-2-IT	5,16	162,26
8	L200-6-3-IT	6,36	200,00
9	L400-6-4-IT	4,78	150,31
10	С-3-IT	0,55	17,30
11	L200-12-1-IT	8,35	131,29
12	L400-12-2-IT	8,25	129,72
13	L200-12-3-IT	5,82	91,51
14	L400-12-4-IT	9,17	144,18
15	С-6-IT	1,09	17,14

Табл. 5

Сравнение экспериментальных u_{exp} и расчетных u_{num} значений продольного перемещения

Образец	Код образца	F_{exp} , Н	u_{exp} , мм	u_{num} , мм	Ошибка, %
1	L200-6-1-ТТ	6670,21	5,07	4,58	9,66
2	L400-6-2-ТТ	7300,26	7,05	6,44	8,65
3	L200-6-3-ТТ	6360,56	4,94	4,45	9,92
4	L400-6-4-ТТ	6000,42	6,50	5,92	8,92
5	С-3-ТТ	318,12	1,08	1,02	5,56

2.1.2. Ударное испытание. Данные рис. 6—а, б иллюстрируют влияние поверхностной плотности и последовательности укладки на энергию удара МВК с шестью слоями. Наибольшее значение энергии удара продемонстрировал образец L200-6-3-ИТ со слоями стеклоткани с поверхностной плотностью 200 г/м², а наименьшее — образец L400-6-4-ИТ.

Результаты для МВК с 12 слоями представлены на рис. 6—в, г. Наибольшее значение энергии удара продемонстрировал образец L400-12-4-ИТ, имеющий слой стеклоткани с поверхностной плотностью 400 г/м², а наименьшую — образец L200-12-3-ИТ.

Экспериментальные значения энергии удара E^{imp} и ударной прочности σ^{imp} образцов МВК представлены в табл. 4. Введение в композицию слоев стеклоткани существенно повысило ударную прочность МВК. Последовательность укладки слоев также имела важное значение, тогда как количество слоев повлияло в меньшей степени.

2.2. Численный анализ. 2.2.1. Испытание на растяжение. Экспериментальные u_{exp} и расчетные u_{num} значения предельного продольного перемещения образцов МВК приведены в табл. 5. Вычисленная ошибка свидетельствует о хорошем согласовании результатов.

2.2.2. Ударное испытание. Экспериментальные и расчетные значения энергии удара образцов МВК приведены в табл. 6.

Табл. 6

Сравнение экспериментальных $E_{\text{exp}}^{\text{imp}}$ и расчетных $E_{\text{num}}^{\text{imp}}$ значений энергии удара образцов

Образец	Код образца	$E_{\text{exp}}^{\text{imp}}$, Дж	$E_{\text{num}}^{\text{imp}}$, Дж	Ошибка, %
6	L200-6-1-ИТ	5,24	4,72	9,92
7	L400-6-2-ИТ	5,16	4,81	6,78
8	L200-6-3-ИТ	6,36	5,75	9,59
9	L400-6-4-ИТ	4,78	4,62	3,35
10	С-3-ИТ	0,55	0,51	7,27

Заключение

В металловолоконистых слоистых композитах наряду с композитными слоями используют металлические слои, улучшающие механические свойства, особенно ударопрочность. Исследовали прочность при растяжении, модуль упругости и ударную прочность образцов металловолоконистых композитов с полимерной матрицей. Изучили влияние поверхностной плотности стеклоткани и последовательности укладки слоев. Таким образом, исследованы два типа многослойных конфигураций металловолоконистых композитов. Механические характеристики контрольных образцов, имеющие только три и шесть слоев алюминиевого листа, сравнивали с таковыми образцов из многослойных металловолоконистых композитов. На основе полученных результатов можно заключить следующее.

- Образцы L200-6-1-ТТ и L400-6-2-ТТ продемонстрировали больший модуль Юнга и прочность при растяжении, чем образцы L200-6-3-ТТ и L400-6-4-ТТ с таким же количеством слоев, но альтернативной укладкой. При этом все образцы металловолоконистых композитов обладали большим модулем упругости и прочностью при растяжении, чем контрольный образец С-3-ИТ с тремя алюминиевыми слоями.

- Энергия удара 6-слойного образца L200-6-3-ИТ больше, чем L200-6-1-ИТ с альтернативной последовательностью укладки, и примерно в 12 раз больше, чем контрольного образца С-3-ИТ. Увеличение количества слоев в укладке металловолоконистых композитов до 12 позволило увеличить энергию удара.

- Наибольшую ударную прочность продемонстрировал образец L200-6-3-ИТ, ударное сопротивление которого примерно в 12 раз больше, чем контрольного образца. При этом ударная прочность всех образцов из металловолоконистых композитов значительно больше, чем контрольных.

- Результаты численного анализа МКЭ хорошо согласуются с экспериментальными.

- Полученные результаты свидетельствуют о том, что металловолоконистые композиты с чередующейся укладкой слоев стеклоткани и алюминиевых листов ([AL/FI/AL/FI/AL/FI]), как правило, обладают лучшими механическими характеристиками, чем с альтернативной укрупненной укладкой ([2AL/FI/AL/2FI]).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Golmakani M. E., Wiczenbach T., Malikan M., Mahoori S. M., and Eremeyev V. A.* Experimental and numerical investigation of tensile and flexural behavior of nanoclay wood-plastic composite // *Materials*. — 2021. — Vol. 14, No. 11. — P. 2773.
2. *Golmakani M. E., Wiczenbach T., Malikan M., Aliakbari R., and Eremeyev V. A.* Investigation of wood flour size, aspect ratios, and injection molding temperature on

mechanical properties of wood flour/polyethylene composites // *Materials*. — 2021. — Vol. 14, No. 12. — P. 3406.

3. *Nowak D., Clapa M., Kula P., Sochacki M., Stonio B., Galazka M., Pelka M., Kuten D., and Niedzielski P.* Influence of the interactions at the graphene–substrate boundary on graphene sensitivity to UV irradiation // *Materials*. — 2019. — Vol. 12, No. 23. — P. 3949.

4. *Li L., Lang L., Khan S., and Wang Y.* Investigation into effect of the graphene oxide addition on the mechanical properties of the fiber metal laminates // *Polym. Test*. — 2020. — Vol. 91, No. 106766.

5. *Kazemi M. E., Shanmugam L., Chen S., Yang L., and Yang J.* Novel Thermoplastic fiber metal laminates manufactured with an innovative acrylic resin at room temperature // *Composites: Part A*. — 2020. — Vol. 138. — Paper No. 106043.

6. *Rathnasabapathy M., Mouritz A. P., and Orifici A. C.* Finite element modelling of the impact response of fibre metal laminates under tension preloading // *Composites: Part A*. — 2022. — Vol. 157, No. 106930.

7. *Rathnasabapathy M., Orifici A. C., and Mouritz A. P.* Impact damage to fibre metal laminates under compression loading // *Compos. Commun.* — 2022. — Vol. 32. — Paper No. 101148.

8. *Li X., Ma X., Li Sh., Guo Y., Shim V. P. W., and Hao X.* Deformation and failure of a novel fiber-metal hybrid lamina composite under quasi-static and impact loading // *Compos. Sci. Technol.* — 2021. — Vol. 216, No. 109067.

9. *Yao L., Wang Ch., He W., Lu Sh., and Xie D.* Influence of impactor shape on low-velocity impact behavior of fiber metal laminates combined numerical and experimental approaches // *Thin Wall Struct.* — 2019. — Vol. 145, No. 106399.

10. *Megahed M., Abd El-baky M. A., Alsaedy A. M., and Alshorbagy A. E.* Improvement of impact and water barrier properties of GLARE by incorporation of different types of nanoparticles // *Fibers Polym.* — 2020. — Vol. 21. — P. 840—848.

11. *Abd El-Baky M. A. and Attia M. A.* Experimental study on the improvement of mechanical properties of glare using nanofillers // *Polym. Compos.* — 2020. — Vol. 41. — P. 4130—4143.

12. *Bienias J., Jakubczak P., Surowska B., and Dragan K.* Low-energy impact behaviour and damage characterization of carbon fibre reinforced polymer and aluminium hybrid laminates // *Arch. Civ. Mech. Eng.* — 2015. — Vol. 15, No. 4. — P. 925—932.

13. *Sadighi M., Alderliesten R. C., and Benedictus R.* Impact resistance of fiber-metal laminates: a review // *Int. J. Impact Eng.* — 2022. — Vol. 49. — P. 77—90.

14. *Song S. H., Byun Y. S., Ku T. W., Song W. J., Kim J., and Kang B. S.* Experimental and numerical investigation on impact performance of carbon reinforced aluminum laminates // *J Mater. Sci. Technol.* — 2010. — Vol. 26, No. 4. — P. 327—332.

15. *Reyes V. G. and Cantwell W. J.* The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene // *Compos. Sci. Technol.* — 2000. — Vol. 60, No. 7. — P. 1085—1094.

16. *Kotik H. G. and Perez Ipiña J. E.* Short-beam shear fatigue behavior of fiber metal laminate (Glare) // *Int. J. Fatigue*. — 2017. — Vol. 95. — P. 236—242.

17. *Shamohammadi Maryan M., Ebrahimnezhad-Khaljiri H., and Eslami-Farsani R.* The experimental assessment of the various surface modifications on the tensile and fatigue behaviors of laminated aluminum/aramid fibers-epoxy composites // *Int. J. Fatigue*. — 2022. — Vol. 154, No. 106560.

18. *Vasudevan A., Navin Kumar B., Depoures M. Victor, Maridurai T., and Mohanavel V.* Tensile and flexural behaviour of glass fibre reinforced plastic. Aluminium hybrid laminate manufactured by vacuum resin transfer moulding technique (VARTM) // *Mater. Today-Proc.* — 2021. — Vol. 37. — P. 2132—2140.

19. *Hu Ch., Sang L., Jiang K., Xing J., and Hou W.* Experimental and numerical characterization of flexural properties and failure behavior of CFRP/Al laminates // *Compos. Struct.* — 2022. — Vol. 281, No. 115036.
20. *Zakeri M., Mansoori H., Sadeghian M., and Guagliano M.* Impact response of fiber metal laminates based on aluminum and UHMWPE composite: Numerical simulation // *Thin Wall Struct.* — 2022. — Vol. 172. — P. 108796.
21. *Zhu W., Xiao H., Wang J., and Fu Ch.* Characterization and properties of AA6061-based fiber metal laminates with different aluminum-surface pretreatments // *Compos. Struct.* — 2019. — Vol. 227. — Paper No. 111321.
22. *Vo Th. P., Guan Z. W., Cantwell W. J., and Schleyer G. K.* Modelling of the low-impulse blast behaviour of fibre-metal laminates based on different aluminium alloys // *Composites: Part B.* — Vol. 44, No. 1. — P. 141—151.
23. *Khan S. H., Sharma A. P., Kitey R., and Parameswaran V.* Effect of metal layer placement on the damage and energy absorption mechanisms in aluminium/glass fibre laminates // *Int. J. Impact Eng.* — 2018. — Vol. 119. — P. 14—25.
24. *Sharma A. P. and Khan S. H.* Influence of metal layer distribution on the projectiles impact response of glass fiber reinforced aluminum laminates // *Polym. Test.* — 2018. — Vol. 70. — P. 320—347.
25. *Rajkumar G. R., Krishna M., Narasimhamurthy H. N., Keshavamurthy Y. C., and Nataraj J. R.* Investigation of tensile and bending behavior of aluminum based hybrid fiber metal laminates // *Proc. Mater. Sci.* — 2014. — Vol. 5. — P. 60—68.
26. *Gunnink J. W.* Composite laminate of metal sheets and continuous filaments-reinforced synthetic layers // (Akzo NV, Arnhem, The Netherlands) US Pat 4 935 291 (19 June 1990), *Compos.*, 23, 205 (1992).

Поступила в редакцию 11.04.2022

Окончательный вариант поступил 04.11.2022

Received Apr. 11, 2022 (Nov. 4, 2022)
