

Влияние характеристик армирующей ткани на механические свойства стеклопластиков

К.А. АНДРИАНОВА,
канд. техн. наук,
В.С. НИКИТИН,
И.В. ДВОЕГЛАЗОВ,
К.В. КОРИНЕНКО,
студент
(КНИТУ-КАИ, Казань)
kaandrianova@kai.ru

Проведено комплексное исследование влияния поверхностной плотности армирующей ткани на характеристики прочности и ударостойкости стеклопластиков. Показано, что с увеличением поверхностной плотности ткани модуль упругости стеклопластика при растяжении и изгибе увеличивается, так же, как и удельный модуль. Выявлен более сложный характер зависимости предела прочности при изгибе и растяжении стеклопластиков от поверхностной плотности армирующей ткани. Проведен анализ деформирования композитных пластин с разной толщиной армирующей ткани при ударном нагружении в программном комплексе ANSYS. Показана высокая сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными.

Поверхностная плотность, ткань, стеклопластик, растяжение, трехточечный изгиб, ударостойкость, ANSYS

В настоящее время стеклопластики широко используются при производстве изделий для авиационной, автомобильной и строительной отраслей [1]. Несмотря на определенные преимущества по сравнению с металлами, керамикой, пластмассами, стеклопластики не всегда способны удовлетворять совокупности предъявляемых требований, в частности, обеспечивать одновременно высокую жесткость и ударостойкость.

На физико-механические свойства полимерных композитов значительно влияют характеристики армирующих наполнителей. Так, композиты на основе тканых наполнителей благодаря переплетению волоконных жгутов в двух направлениях характеризуются повышенной ударопрочностью по сравнению с однонаправленными композитами [2]. Композиты, армированные тканями наполнителями, также демонстрируют улучшенную остаточную прочность после удара и меньшие повреждения по сравнению с неткаными ламинатами [3].

На физико-механические свойства композитов, армированных тканями наполнителями, влияют следующие характеристики армирующих тканей: тип переплетения [4, 5], плотность переплетения [6], симметричность укладки [7, 8]. Влияние типа переплетения ткани на ударостойкость композитных материалов показана на примере органопластиков на основе эпоксидного связующего [9]. Установлено, что композитные пластины, состоящие из четырех слоев арамидной ткани саржевого переплетения, при воздействии падающего полусферического ударника демонстрируют на 15 % меньший прогиб, по сравнению с образцами, выполненными из ткани с полотняным переплетением. При этом результаты испытаний на ударную вязкость композитных пластин из органопластиков выявили неоднозначную зависимость от переплетения ткани [10].

Согласно анализу данных литературных источников ключевым фактором, определяющим жесткостные и прочностные характеристики композитов, армированных тканями наполнителями, является поверхностная плотность наполнителя. В работе [11] ткани с поверхностными плотностями 610 и 210 г/м² использовались для изготовления восьми- и шестнадцатислойных стеклоламинатов одинаковой толщины. Показано, что увеличение поверхностной плотности ткани с 210 до 610 г/м² независимо от последовательности укладки привело к увеличению прочности на растяжение ламината из стеклопластика на 45–50 % и увеличению на 35–50 % прочности на изгиб при снижении на 10–12 % прочности на сжатие. Аналогичные выводы были сделаны в отношении композитов на основе базальтовых наполнителей [7]. При увеличении поверхностной плотности ткани с 200 до 380 г/м² прочность на изгиб ламината, армированного базальтовой тканью, увеличивалась на 18–30 %.

Противоположный вывод о влиянии поверхностной плотности ткани был сделан при исследовании ламинатов, армированных углеродными тканями. Для производства ламинатов использовались три различные предварительно пропитанные углеткани саржевого переплетения 2×2, характеризующиеся раз-

личными значениями поверхностной плотности (380, 630, 800 г/м²) [12]. Было показано, что поверхностная плотность ткани существенно влияет на механические характеристики композитных ламинатов, в частности, уменьшение поверхностной плотности ткани саржевого переплетения приводит к повышению прочности композита на разрыв, увеличению модуля упругости, а также росту напряжения сдвига в плоскости. Ламинаты на основе углеродной ткани саржевого переплетения демонстрировали ухудшение жесткости в работе [6]. Высокая плотность тканей обуславливала их склонность к расслоению при высоких нагрузках.

В некоторых исследованиях было отмечено, что четкой зависимости механических свойств композиционных материалов от поверхностной плотности ткани не наблюдалось. В работе [13] для сравнения свойств композиционных материалов использовали стеклоткани с тремя разными поверхностными плотностями (200, 400, 600 г/м²), при этом получаемые образцы имели одинаковую толщину и плотность. Было показано, что поверхностная плотность ткани существенно влияет на свойства стеклопластиков, и при увеличении ее в определенном диапазоне свойства материала улучшаются. Однако при определенном увеличении поверхностной плотности свойства стеклопластиков ухудшаются за счет создания полостей и уменьшения межслоевого контакта. Так, стеклопластики, армированные тканью с поверхностной плотностью 400 г/м², отличаются более высокими значениями характеристик в сравнении с образцами, армированными тканями с поверхностной плотностью 200 и 600 г/м². Таким образом, при увеличении поверхностной плотности ткани в определенном диапазоне свойства стеклопластиков улучшаются, однако линейной зависимости не наблюдается.

Таким образом, анализ известных научных публикаций указывает на отсутствие однозначных данных, позволяющих достоверно оценить влияние поверхностной плотности и толщины армирующей ткани на различные механические свойства полимерных композитов. Полученные результаты весьма противоречивы, что, вероятно, обусловлено использованием тканей в ограниченном диапазоне поверхностной плотности, вследствие чего были сформулированы противоположные выводы относительно характера ее влияния.

Целью данной работы являлось комплексное исследование влияния поверхностной плотности ткани на характеристики прочности, жесткости, а также ударостойкость стеклопластиков.

В качестве связующего для получения стеклопластиков использовали эпоксидное связующее Т 20-60 («Итекма», Россия). В качестве армирующего материала использовали пять тканей из стекловолокна с поверхностной плотностью 67, 100, 200, 300, 600 г/м². Все ткани характеризовались одинаковым типом переплетения – полотняным.

Характеристики тканей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Марка ткани на основе стекловолокна	Поверхностная плотность, г/м ²	Толщина, мм
ЭЗ-62ПМ-20	67	0,062
ЭЗ-100	100	0,1
ЭЗ-200	200	0,190
Ortex 360	300	0,36
Ortex 600	600	0,42

Для определения физико-механических свойств стеклопластиков были изготовлены пластины размером 350×350×4 мм. Количество слоев ткани в пластинах было рассчитано с учетом одинаковой толщины образцов. Выкладка слоев армирующего материала проводилась вручную по квазиизотропной схеме [(+45/-45)(0/90)], рекомендованной стандартными методиками.

Количество слоев ткани представлено в табл. 2.

Изготовление пластин осуществлялось методом вакуумной инфузии в несколько этапов.

1. Подготовка формообразующей оснастки.
2. Выкладка слоев армирующего материала согласно выбранной схеме укладки.
3. Сборка вакуумного мешка.
4. Подача вакуума и формование пластины.

Таблица 2

Номер образца	Марка ткани	Количество слоев ткани в пластине	Плотность, г/см ³	Объемная доля волокна, %
1	ЭЗ-62ПМ-20	67	1,6786	40,19
2	ЭЗ-100	36	1,8160	47,36
3	ЭЗ-200	24	1,8477	49,85
5	Ortex 360	18	1,8750	52,64
6	Ortex 600	10	1,9284	55,98

Отверждение проводили при комнатной температуре 24 ч, последующая термообработка проводилась при 60 °С в течение 3 ч.

Из полученных пластин вырезались образцы для механических испытаний. Плотность стеклопластиков определяли методом гидростатического взвешивания по ASTM D792-20, объемная доля стекловолокна оценивалась по ASTM D 3171-15 методом выжигания матрицы. Значение плотности и объемной доли волокна стеклопластиков показаны в табл. 2.

Механические характеристики определялись при испытаниях на два вида нагружения – растяжение (ГОСТ Р 56785) и поперечный изгиб (ГОСТ Р 56805). Испытания проводились с использованием универсальной электромеханической машины Instron 5882 (100 кН). Продольная и поперечная деформация образцов при растяжении измерялась с использованием контактных экстензометров Epsilon 3542 и Epsilon 3475.

Оценка ударостойкости стеклопластиков проводилась по ASTM D 7136 с помощью копра с вертикально падающим грузом Instron Dunatup 9250 HV. Суть метода заключается в нанесении ударного воздействия на образец с использованием свободно падающего груза, оснащенного наконечником полусферической формы [14]. Для оценки ударостойкости образцы стеклопластиков подвергались воздействию падающего груза с энергией удара 5, 15, 25 Дж. Для оценки остаточной прочности после ударных испытаний образцы испытывались на сжатие. Исследование остаточной прочности проводилось на универсальной установке для механических испытаний Instron 5882 с использованием специальной оснастки на сжатие для обеспечения нагружения композитного образца в режиме чистого сжатия.

В результате испытаний на растяжение образцов стеклопластиковых ламинатов были получены диаграммы «напряжение – деформация». В качестве примера на рис. 1, а представлены кривые «напряжение – деформация» образцов стеклопластика, армированного тканью с поверхностной плотностью 600 г/м². Были определены значения предела прочности и модуля упругости при растяжении. Определение упругих характеристик стеклопластиков проводили в пределах зоны пропорционального роста напряжения и деформации (рис. 1, б).

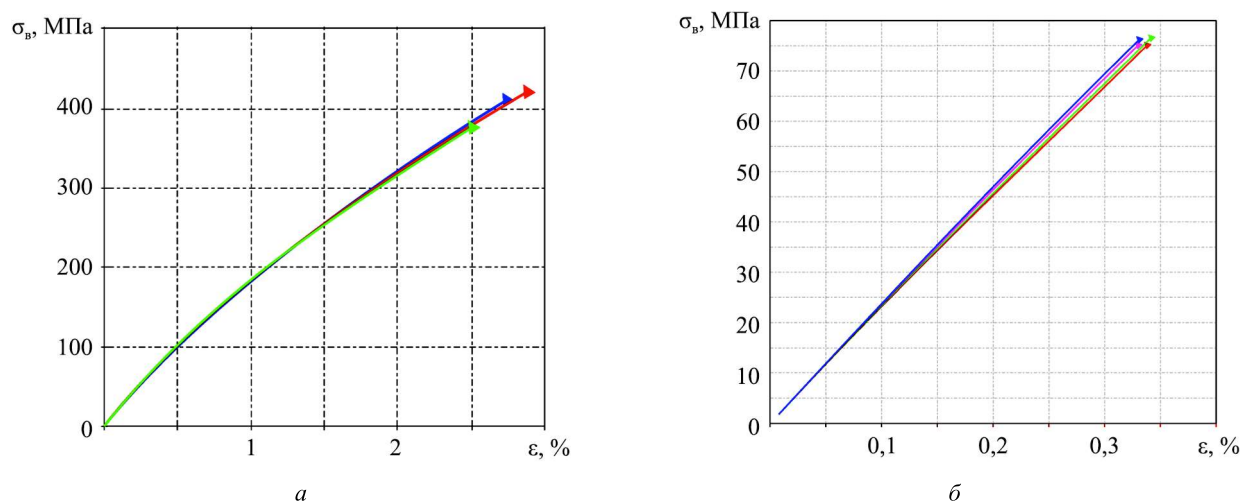


Рис. 1

Продемонстрируем влияние поверхностной плотности ткани на модуль упругости (рис. 2, *a*) и предел прочности (рис. 2, *б*) при растяжении для стеклопластиковых ламинатов. На оси абсцисс расположены марки тканей в порядке возрастания поверхностной плотности.

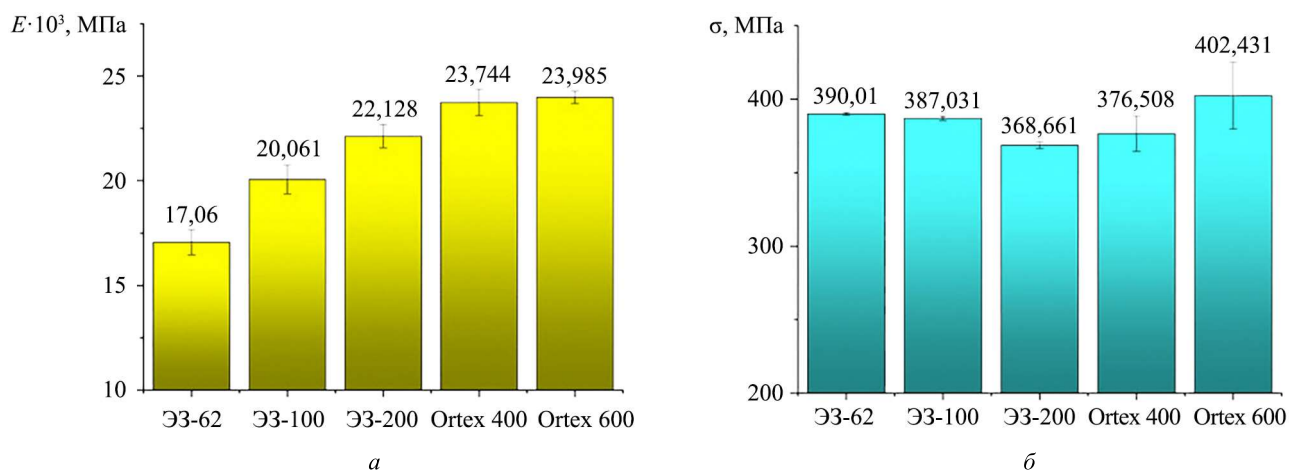


Рис. 2

Как видим (см. рис. 2, *a*), модуль упругости стеклопластика возрастает с увеличением поверхностной плотности армирующей ткани. Предел прочности стеклопластиков при растяжении не так сильно зависит от поверхностной плотности, линейной зависимости не наблюдается (см. рис. 2, *б*), что согласуется с литературными данными [13].

Во избежание влияния коэффициента наполнения и плотности стеклопластиков, армированных разными тканями, были построены зависимости удельного модуля упругости (рис. 3, *a*) и удельной прочности стеклопластиков (рис. 3, *б*) при растяжении.

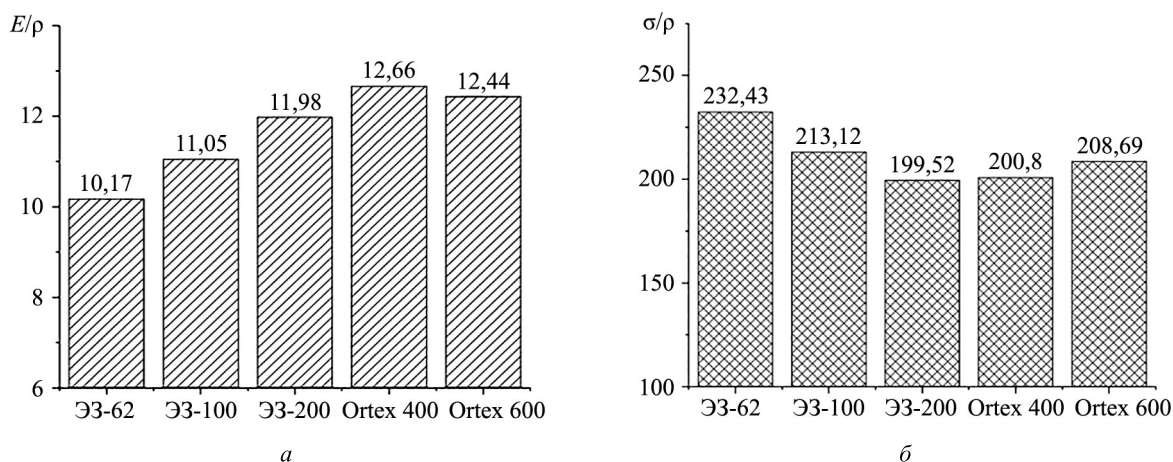


Рис. 3

Как видим (см. рис. 3, *a*), с увеличением поверхностной плотности ткани удельный модуль возрастает, а потом незначительно снижается для образца, армированного тканью с поверхностной плотностью 600 г/м². Зависимость удельной прочности стеклопластиков от поверхностной плотности ткани (см. рис. 3, *б*) аналогична зависимости прочности (см. рис. 2, *б*).

Стеклопластики подвергались испытаниям на трехточечный изгиб. Для всех типов образцов кривые «напряжение – деформация» демонстрируют линейный рост нагрузки на начальном этапе испытания с последующим отклонением от линейности до достижения максимального пикового значения, что, вероятно, обусловлено некоторой пластической деформацией.

Продемонстрируем влияние поверхностной плотности ткани на модуль упругости (рис. 4, *a*) и предел прочности (рис. 4, *б*) при изгибе для стеклопластиковых образцов.

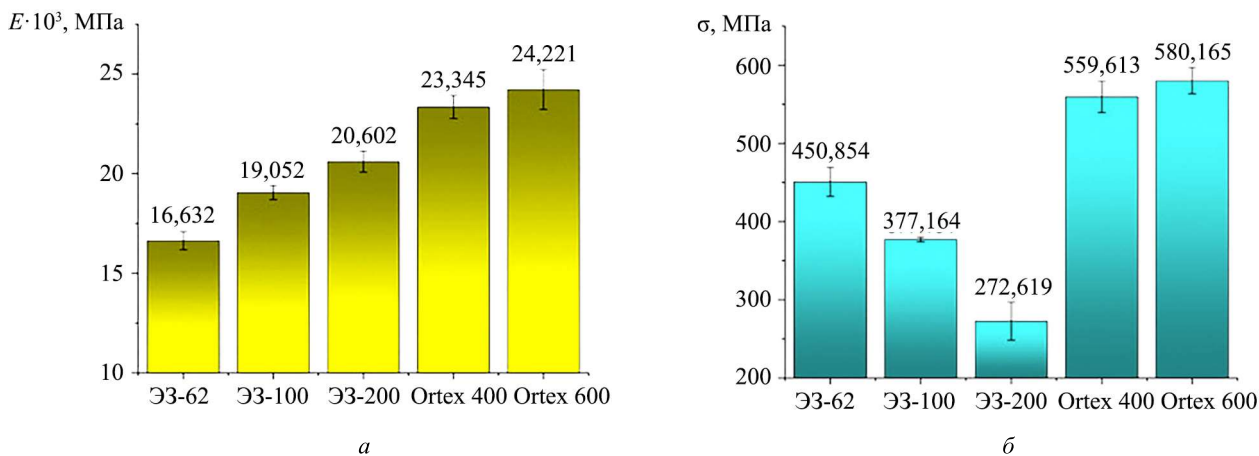


Рис. 4

На рис. 5 представлены удельные значения модуля упругости (рис. 5, а) и прочности (рис. 5, б) стеклопластиков, полученные при испытании на трехточечный изгиб.

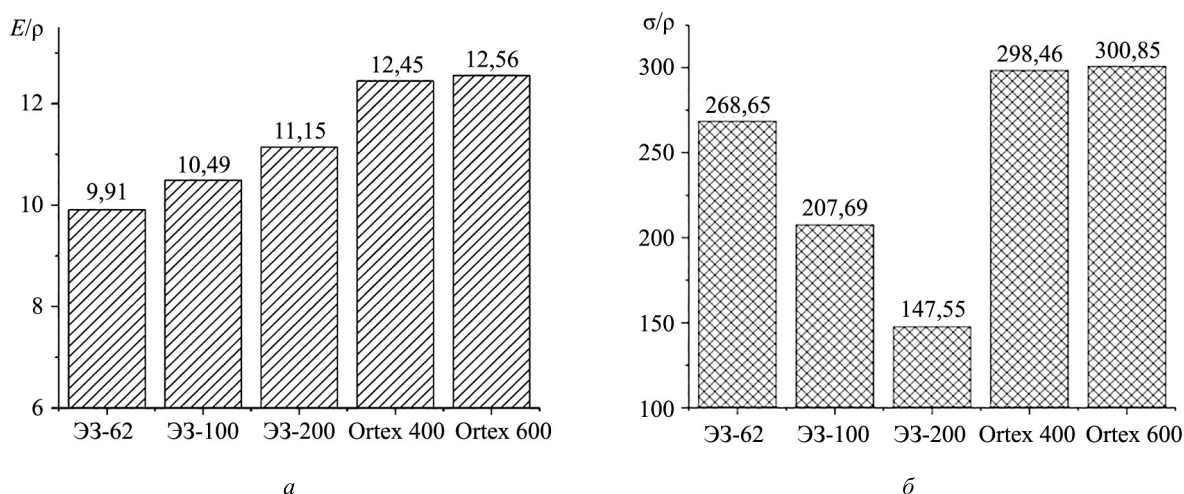


Рис. 5

Как видим (см. рис. 4, 5), с увеличением поверхностной плотности ткани модуль упругости и удельный модуль стеклопластиков увеличивается. Предел прочности и удельная прочность стеклопластиков вначале уменьшается с увеличением поверхностной плотности армирующего материала, затем возрастает. Максимальная прочность наблюдается в случае стеклопластика, армированного тканью с поверхностной плотностью 600 г/м². Снижение прочности композиционных материалов с увеличением поверхностной плотности армирующей ткани объяснялось увеличением воздушных полостей и уменьшением межслоевого контакта [13]. Типичными видами разрушения, зарегистрированными в стеклопластиковых образцах, являются расслоение, разрыв волокон и растрескивание матрицы.

Для оценки влияния поверхностной плотности ткани на ударостойкость образцы стеклопластиков подвергали ударному воздействию (5, 15, 25 Дж) падающего груза. В результате испытаний были получены зависимости отклика нагрузки от времени различных конфигураций образцов при 5, 15, 25 Дж. В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены данные для стеклопластиков, армированных тканью с поверхностной плотностью 62 г/м².

Как видим (см. рис. 6), наклон графика «нагрузка – время» увеличивается с увеличением энергии удара. Максимальная нагрузка увеличивается с повышением уровня энергии.

По данным, полученным в результате эксперимента, построены диаграммы значений поглощенной энергии при ударе для стеклопластиков, армированных тканями разной поверхностной плотности (рис. 7).

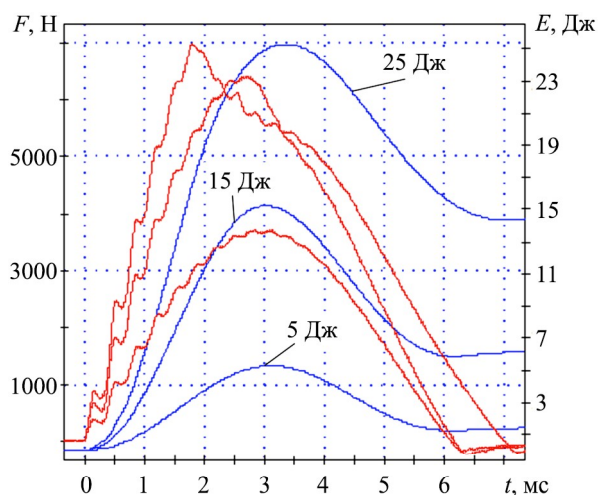


Рис. 6

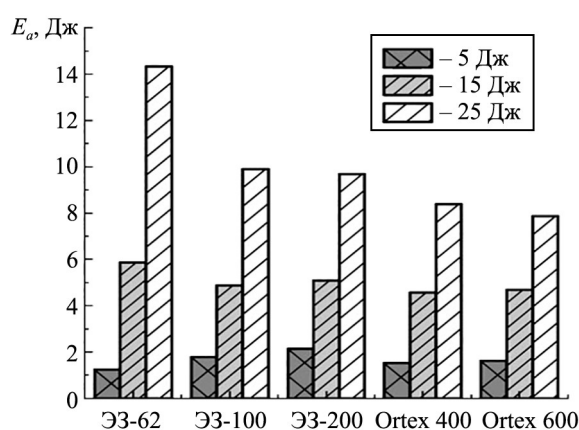


Рис. 7

Как видим (см. рис. 7), максимальную величину поглощенной энергии имеет образец, армированный стеклотканью с самой низкой поверхностной плотностью. С увеличением поверхностной плотности ткани наблюдается снижение величины поглощенной при ударе энергии. Данный эффект наиболее четко проявляется при ударных испытаниях с энергией 25 Дж, менее выражен он при энергии 15 Дж. При малоэнергетическом ударе (5 Дж) такая зависимость уже не выявляется.

Типичным повреждением стеклопластиковых пластин при небольших энергиях ударного воздействия является вмятина, а при ударе с энергией 25 Дж наблюдается расслоение. Форма повреждения стеклопластиков, армированных тканями с разной поверхностной плотностью, также отличается. В случае стеклопластиков, армированных тканями с поверхностной плотностью 100 и 200 г/м², наблюдается расслоение в осевом направлении, а у остальных стеклопластиков отпечаток после повреждения имеет сферическую форму.

Для оценки остаточной прочности образцы, испытанные на удар падающим грузом, подвергались сжатию. Результаты испытаний стеклопластиков на сжатие после удара представлены на рис. 8. Как видим (см. рис. 8), с увеличением поверхностной плотности ткани остаточная прочность стеклопластиков сначала падает, потом возрастает, а у стеклопластика, армированного тканью с поверхностной плотностью 600 г/м², величина остаточной прочности после удара имеет самое высокое значение.

Отметим, что при испытаниях на постударное сжатие стеклопластика, армированного тканью с поверхностной плотностью 62 г/м², разрушение образцов происходило не в зоне удара, а по кромке образца под нагружающими пластинами, даже при наличии повреждения от удара воздействия с энергией 25 Дж. В то же время для остальных стеклопластиков характерно разрушение при сжатии в ожидаемом месте, непосредственно в месте приложения ударной нагрузки. Поскольку все испытания проводились в иден-

точных условиях – с контролем установки и подготовки оснастки, в том числе базовой плоскости оснастки и центра приложения нагрузки, – наблюдаемый эффект не может быть обусловлен экспериментальными погрешностями. Вероятно, вследствие низкой жесткости стеклопластика, армированного тканью с поверхностной плотностью 62 г/м², примененная методика испытаний оказывается неадекватной и не позволяет однозначно определить постударную прочность.

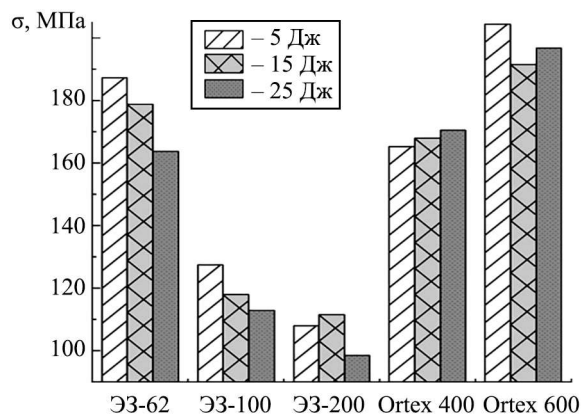


Рис. 8

Экспериментальное исследование параметров ударостойкости является достаточно долгим и трудоемким процессом. Процесс деформирования при низкоскоростном ударе композитных пластин, армированных тканями разной толщины, может быть смоделирован. В данной работе моделирование проводилось в программных комплексах ANSYS и LS-DYNA. В каждом численном эксперименте значение кинетической энергии задавалось равным ее значению в натурном эксперименте. Модель ударника представляла собой деталь, состоящую из цилиндра (высота – 5 мм, диаметр – 16 мм) и полусферы диаметром 16 мм. Модель многослойной композитной пластины создавалась с учетом толщины и количества монослоев в каждой пластине в зависимости от поверхностной плотности армирующей ткани.

На рис. 9, а показана геометрическая модель, на рис. 9, б – конечно-элементная сетка. Распределение деформаций при ударе иллюстрирует рис. 9, в.

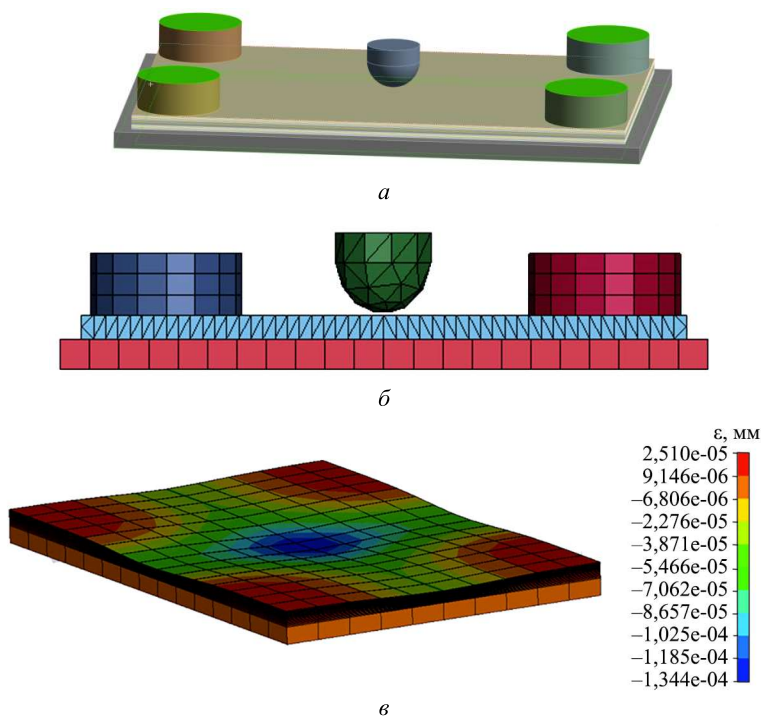


Рис. 9

Построенная модель контакта жесткой сферы с композитной пластиной была использована для расчета деформации стеклопластиковых образцов, армированных тканями разной поверхностной плотности.

В табл. 3 приведены значения прогиба композитных пластин при максимальной энергии удара, полученные экспериментально и с помощью расчетов.

Таблица 3

Тип армирующего наполнителя	Скорость удара, м/с	Величина перемещения при ударе в эксперименте, мм	Величина перемещения при ударе в расчете, мм	Величина отклонения расчетных значений от экспериментальных, %
ЭЗ-62	1,3405	2,8314	2,99	5,51
	2,3420	4,6604	4,86	4,21
	3,0341	4,9073	4,98	1,45
ЭЗ-100	1,3407	3,7958	3,56	6,62
	2,3425	6,1458	5,96	3,12
	3,0346	7,5851	7,47	1,54
ЭЗ-200	1,3474	3,3488	3,4	1,51
	2,3515	5,4936	5,91	7,05
	3,0390	7,0434	7,4	4,82
Ortex 360	1,3412	3,3200	3,44	3,49
	2,3444	5,4074	5,87	7,88
	3,0320	6,8360	7,0	2,34
Ortex 600	1,3475	2,7505	3,1	12,7
	2,3428	4,6811	5,2	11,09
	3,0331	5,9867	6,79	13,84

Результаты численного моделирования демонстрируют хорошее соответствие данным натурных экспериментов. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями прогиба при ударном нагружении образцов не превышает 15 %. Расчетные модели могут быть использованы для прогнозирования деформирования композитных пластин, армированных тканями разной поверхностной плотности.

Таким образом, исследовано влияние поверхностной плотности стеклоткани на характеристики ударостойкости стеклопластиков. Для изготовления композитных материалов использовали ткани с поверхностной плотностью 67, 100, 200, 300, 600 г/м² и эпоксидное связующее. Были проведены испытания стеклопластиков, включающие трехточечный изгиб, растяжение, ударное нагружение, а также оценку остаточной прочности после удара посредством испытания на сжатие. Показано, что модуль упругости стеклопластиков при растяжении и изгибе возрастает с увеличением поверхностной плотности армирующей ткани. Предел прочности стеклопластиков демонстрирует слабую зависимость от поверхностной плотности, линейной зависимости не выявлено, что согласуется с данными, представленными в научной литературе. Аналогичные зависимости получены для удельных характеристик прочности и модуля упругости при изгибе и растяжении. Максимальная величина поглощенной энергии при ударе наблюдается у образца, армированного стеклотканью с самой низкой поверхностной плотностью. Стеклопластики, армированные тканью с высокой поверхностной плотностью, характеризуются более высоким значением максимальной нагрузки и меньшей величиной прогиба при ударе. Проведен анализ деформирования композитных пластин с разной толщиной армирующей ткани при ударном нагружении в программном комплексе ANSYS. Показана высокая сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными. Полученные данные могут быть использованы для проектирования и изготовления изделий из стеклопластиков с повышенными значениями механических характеристик и ударостойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sathishkumar T. P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites—A Review // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Vol. 33. Iss. 13. P. 1258–1275.
2. Hosur M.V. et al. Studies on Impact Damage Resistance of Affordable Stitched Woven Carbon/Epoxy Composite Laminates // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2003. Vol. 22. Iss. 10. C. 927–952.

3. Hosur M.V., Karim M. R., Jeelani S. Experimental Investigations on the Response of Stitched/Unstitched Woven S2-Glass/SC15 Epoxy Composites under Single and Repeated Low Velocity Impact Loading // Composite Structures. 2003. Vol. 61. Iss. 1-2. P. 89–102.
4. Saunders R.A., Lekakou C., Bader M.G. Compression in the Processing of Polymer Composites 1. A Mechanical and Microstructural Study for Different Glass Fabrics and Resins // Composites Science and Technology. 1999. Vol. 59. Iss. 7. P. 983–993.
5. Guowei Zhou ye al. Experimental Investigation on the Effects of Fabric Architectures on Mechanical and Damage Behaviors of Carbon/Epoxy Woven Composites // Composite Structures. 2021. Vol. 257. Article № 113366.
6. Kiasat M.S., Sangtabi M.R. Effects of Fiber Bundle Size and Weave Density on Stiffness Degradation and Final Failure of Fabric Laminates // Composites Science and Technology. 2015. Vol. 111. C. 23–31.
7. Biswas R., Sharma N., Singh K.K. Influence of Fiber Areal Density on Mechanical Behavior of Basalt Fiber/Epoxy Composites under Varying Loading Rates: An Experimental and Statistical Approach // Polymer Composites. 2023. Vol. 44. Iss. 4. P. 2222–2235.
8. Anjaneyulua J., Moizuddin Md., Chandra Kumar P. Evaluation of Mechanical Behaviour of Glass Fibre-Epoxy Composite Laminates // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 22. P. 2899–2905.
9. Куприянова Е.В., Гавриков И.С., Морозова Т.В. Исследование поведения при ударе эпоксипластиков с волоконными дисперсным наполнением // Вестник Технологического университета. 2020. № 8. С. 50–53.
10. Куприянова Е.В. и др. Повышение ударостойкости эпоксидных органопластиков // Пластические массы. 2020. № 9-10. С. 67–68.
11. Ansari M.T.A., Singh K.K., Azam M.S. Effect of Fabric Areal Density on the Mechanical Behaviour of Symmetric and Asymmetric Woven GFRP Composite // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. P. 5649–5652.
12. Andreozzi M. et al. Effect of Fabric Areal Weight on the Mechanical Properties of Composite Laminates in Carbon-Fiber-Reinforced Polymers // Journal of Composites Science. 2023. Vol. 7. № 9. Article № 351.
13. Rezaei H., Hamzeh S., Amirian Y. Experimental Investigation of the Woven Fiber Areal Density Effect on the Tensile and Flexural Behavior of Glass-Epoxy Laminates // Journal Of Marine Engineering. 2022. Vol. 18. Iss. 35. P. 89–96.
14. Митряйкин В.И., Беззаметнов О.Н., Кротова Е.В. Исследование прочности композиционных материалов с ударными повреждениями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 3. С. 27–33.

Поступила в редакцию 7.07.25

После доработки 9.11.25

Принята к публикации 9.11.25

The Influence of Fabric Characteristics on the Mechanical Properties of Glass Fiber-Reinforced Plastics

K.A. ANDRIANOVA, V.S. NIKITIN, I.V. DVOEGLAZOV, AND K.V. KORINENKO

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

A comprehensive study was conducted to examine the influence of the areal density of fabric on the strength and impact resistance of glass fiber-reinforced plastics. It was shown that with increasing areal density, the tensile and flexural modulus of fiberglass composites increases, as well the specific modulus. A more complex relationship between the tensile and flexural strength of glass fiber-reinforced plastics and the areal density of fabric was revealed. The deformation of composite plates with varying reinforcing fabric thicknesses under impact loading was analyzed using the ANSYS software package. High convergence of the modeling results with experimental data was demonstrated.

Areal weight, fabric, glass fiber-reinforced plastic, tension, three-point bending, impact resistance, ANSYS