

Л. М. Кун^{а}, В. Чжэн^а, С. Б. Ван^{а*}, Г. Д. У^б, Я. Я. Цу^а, Я. Цз. Сюэ^а,
Б. Ч. Ван^а, Х. М. Сюй^а*

^а*Shandong Institute of Nonmetallic Materials, Jinan, Shandong Province, 250031, China*
^б*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong Province, 250100, China*

ВЛИЯНИЕ УКЛАДКИ И УГЛА НЕСООСНОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТО-АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ¹

*L. M. Kong, W. Zheng, X. B. Wang, G. D. Wu, Ya. Ya. Qi, Y. J. Xue, B. Ch. Wang,
and H. M. Xu*

EFFECTS OF LAYERING TYPES AND FIBER OFF-AXIS ANGLE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF S-GLASS-FIBER-REINFORCED COMPOSITES

Keywords: VARTM, S-glass fibers, composite, off-axis angle, strength

S-glass-fiber-reinforced plastic layered composites were prepared by the vacuum-assisted resin transfer molding, and their mechanical properties in relation to different layering types were studied. The effects of layering type and off-axis angle on the tensile and flexural strengths of the composites were clarified. In addition, variations in the interlaminar shear strength and bearing strength by bolted joints as functions of off-axis angle were investigated. Results indicated that the tensile and flexural strengths of the S-glass fiber composites with the 0° lamination were more sensitive to the off-axis angle than those with the 0°/90° orthogonal lamination.

Ключевые слова: прессование литьевое с инфузией смолы вакуумной, S-стекловолокна, композит, угол несоосности, прочность

Слоистые композиты с разной укладкой S-стекловолокон изготовили методом литьевого прессования с вакуумной инфузией смолы и изучили их механические свойства. Оценили влияние типа укладки и угла несоосности армирующих волокон на проч-

*Автор, с которым следует вести переписку: kong1211@126.com; wangxb1978@hotmail.com
Corresponding author: kong1211@126.com; wangxb1978@hotmail.com

¹Перевод с англ.

ность композитов при растяжении, изгибе, межслойном сдвиге и прочность при смятии болтовых соединений. Результаты показали, что прочность при растяжении и изгибе однонаправленных стеклопластиков более чувствительна к углу несоосности, чем ортогонально армированных $[0^\circ/90^\circ]$.

Введение

Волокнисто-армированные композиты обладают превосходными механическими характеристиками [1, 2], высокой коррозионной стойкостью [3—5] и хорошими электроизоляционными свойствами [6, 7]. Их широко используют в авиакосмической промышленности, химическом машиностроении, электробытовых приборах, транспорте, машиностроении и других областях национальной экономики [8—13].

S-Стекловолокно, обладающее низкой стоимостью, высокой прочностью при растяжении, высокой химической стойкостью, отличными изоляционными характеристиками и низкими влагопоглощающими свойствами, часто используют в качестве арматуры композитов. В настоящее время многие исследования посвящены механическим свойствам композитов, армированных стекловолокном. В [14] исследовали влияние процентного содержания стекловолокон на механические свойства композитов. Установлено, что с увеличением их содержания прочность при растяжении возросла с 36,32 до 73,99 МПа, при изгибе — с 80,91 до 91,70 МПа, энергия при ударе — с 2 до 6 Дж, твердость — с 16 до 20 ВРН. В [15] влияние содержания и типа волокон на прочность при межслойном сдвиге эпоксидных композитов на основе S-стекловолокон исследовали, анализируя аспекты межповерхностного сцепления и агломерации. В [16, 17] механические свойства стекловолокон сравнили со свойствами других волокон, а также с помощью динамического механического анализатора исследовали вязкоупругие свойства эпоксидного композита с E-стекловолокнами и трех гибридных эпоксидных композитов (с волокнами S- и E-стекла; углеродными; органическими и E-стеклянными). Механические свойства композитов, армированных стекловолокном, изучали также в [18—21] и установили, что их свойства в значительной степени зависят от толщины волокон, их ориентации [22], концентрации [23] и природы [24].

Волокнисто-армированные композиты обычно обладают анизотропными механическими свойствами. Их прочность обеспечивают в основном армирующие волокна, а матрица действует как связующее, удерживающее их вместе [25]. Есть два основных фактора, влияющих на механические свойства композитов, армированных стекловолокнами, — послойная укладка и углы ориентации волокон в слоях [26—28]. В [27] указали, что угол ориентации волокон 10° — наиболее подходящий для выполнения испытания на неосевое растяжение (*off-axis tensile test*) образцов эпоксидных углепластиков с накладками, а в [28] установили, что прочность при сжатии образцов с углом несоосности 15° значительно меньше. Еще один фактор, влияющий на механические свойства волокнисто-армированных

стеклопластиков — процесс изготовления [29, 30]. Процесс формования напрямую влияет на качество композитов, включая массовое содержание составляющих, термостойкость, пористость и межповерхностное сцепление волокон и матрицы — одного из наиболее важных факторов, влияющих на механические свойства волокнисто-армированных композитов [31—33].

Метод литьевого прессования с вакуумной инфузией смолы (ЛПВИС) — один из широко применяемых для изготовления стеклопластиков. В этом экологически дружелюбном производственном процессе преформу композита, помещенную в вакуумный мешок, пропитывают связующим путем инфузии.

В настоящей работе методом ЛПВИС изготовили слоистые стеклопластики из S-стекловолокон и исследовали влияние укладки и угла несоосности на их механические свойства (прочность при растяжении, изгибе, межслойном сдвиге и прочность при смятии болтовых соединений).

1. Эксперимент

Слоистые композиты изготовили из стеклоткани волокон S3000 и винилэфирной смолы MFE-5 с отвердителем. Объемное содержание волокон в композитах $\sim 53,1\%$. Для сравнения изготовили однонаправленные и ортогонально армированные стеклопластики. В однонаправленном композите угол ориентации пучков волокон в слоях 0° (рис. 1—*а*), а в ортогонально армированном $[0^\circ/90^\circ]$ пучки волокон смежных слоев ориентированы под углом 90° (рис. 1—*б*).

Изготовление композитов включало следующие этапы: укладку преформ однонаправленного и ортогонально армированного композитов из предварительно подготовленных слоев стеклоткани в плоской пресс-форме; герметизацию и вакуумирование преформ композитов в вакуумных мешках до давления меньше 95 кПа; осуществление ЛПВИС. В условиях вакуума при давлении 95 кПа винилэфирную смолу полностью перфузировали в преформы композитов. После извлечения пресс-формы композиты для отверждения (при температуре 120°C в течение 2 ч) поместили в камеру для электротермической струйной сушки. Завершающий этап — естественное охлаждение изготовленных стеклопластиков. Объемное содержание стекловолокон в композитах, изготовленных ЛПВИС, $\sim 53,1\%$, а диапазон изменения угла ориентации волокон в образцах менее $0,1\%$.

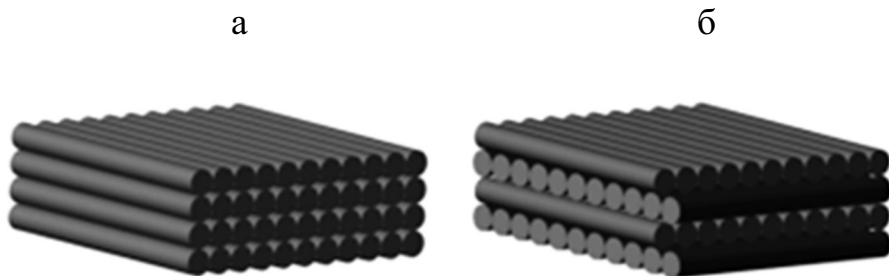


Рис. 1. Однонаправленный (*а*) и ортогонально армированный (*б*) композиты.

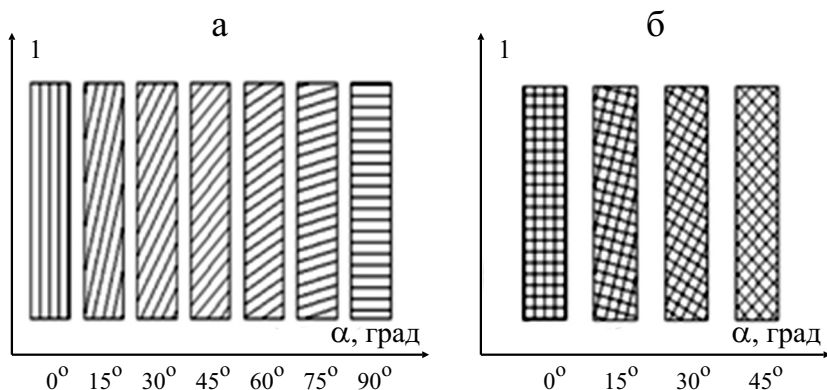


Рис. 2. Образцы однонаправленного (а) и ортогонально направленного (б) композитов с разным углом несоосности α . 1 — направление шпинделя.

Для оценки механических свойств изготовили и исследовали образцы композитов с разными углами несоосности α , характеризующими угол наклона волокон стеклоткани в слоях однонаправленного и ортогонально армированного композитов относительно направления шпинделя (*spindle direction*), как показано на рис. 2. Направление шпинделя далее будем называть направлением осевого напряжения.

Прочность при растяжении, изгибе, межслойном сдвиге и прочность при смятии болтовых соединений оценивали с использованием машины для испытаний на растяжение (SINTECI-I/DL, MTS, США) и машины для динамических испытаний материалов (INSTRON8032, Instron, Англия) по китайским стандартам GB/T1447-2005, GB/T1449-2005, GB/T1450.1-2005 и GB/T7559-2005 соответственно. Для определения прочности при растяжении и изгибе образцы толщиной 4 мм изготовили из однонаправленного и ортогонально армированного композитов, форма и размеры которых показаны на рис. 3—а, б. Образцы из однонаправленного стеклопластика изготовили с углом несоосности $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$, а из ортогонально армированного — $\alpha = 0, 15, 30, 45^\circ$. Для определения прочности при межслойном сдвиге в соответствии со стандартом GB/T1450.1-2005 изготовили образцы ортогонально армированного стеклопластика толщиной 15 мм с углом несоосности $\alpha = 0, 15, 30, 45^\circ$. Форма и размеры показаны на рис. 3—в. Испытания для определения прочности при смятии болтовых соединений провели по стандарту GB/T7559-2005 на образцах из ортогонально армированного стеклопластика толщиной 2 мм и углом несоосности $\alpha = 0, 15, 30, 45^\circ$. Форма и размеры показаны на рис. 3—г.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Влияние укладки и угла несоосности на прочность при растяжении и изгибе.

Результаты, полученные при растяжении и изгибе образ-

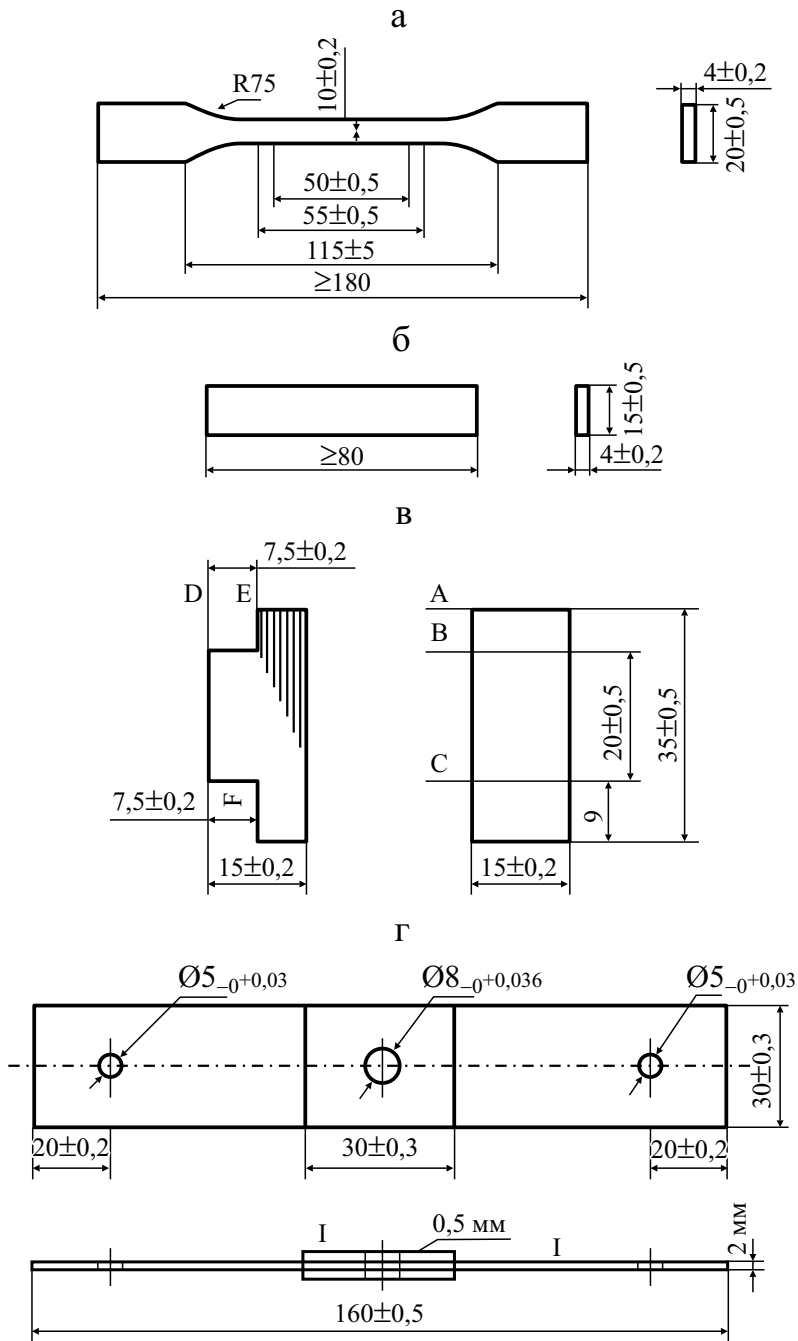


Рис. 3. Форма и размеры (мм) образцов для испытаний на растяжение (а); изгиб (б); межслойный сдвиг (в); прочность при смятии болтового соединения (г). I — алюминиевая пластина.

цов с разным углом несоосности α , показаны на рис. 4. Видно, что прочность при растяжении и изгибе образцов из однонаправленного композита

уменьшалась с увеличением угла несоосности $\alpha = 0—90^\circ$, а образцов из ортогонально армированного композита уменьшалась в диапазоне изменения угла $\alpha = 0—45^\circ$ и возрастала в диапазоне изменения угла $\alpha = 45—90^\circ$. Это явление обусловлено различием структуры однонаправленного и ортогонально армированного композитов.

Предположим, что осевое напряжение в однонаправленном композите σ_0^α (угол несоосности α — угол между направлением армирующих волокон и главной осью симметрии в композите), а в ортогонально армированном композите это осевое напряжение $\sigma_{0/90}^\alpha$ соответственно. При $\alpha = 0^\circ$ направление напряжения σ_0^0 во всех волокнах однонаправленного композита совпадает с направлением главной оси симметрии, тогда как в ортогонально армированном композите в этом направлении ориентировано только 50% волокон. В однонаправленном композите с углом несоосности α осевое напряжение равно $\sigma_0^\alpha = \sigma_0^0 \cos \alpha$. В ортогонально армированном композите осевое напряжение равно $\sigma_{0/90}^\alpha \approx \sigma_{0/90}^0 (\cos \alpha + \sin \alpha)$, что близко к $\frac{1}{2} \sigma_0^0 (\cos \alpha + \sin \alpha)$. Поскольку $\cos \alpha \geq \sin \alpha$ в диапазоне α от 0 до 45° , то $\sigma_0^\alpha \geq \sigma_{0/90}^\alpha$. Поэтому осевое напряжение в однонаправленном композите в диапазоне изменения α от 0 до 45° больше, чем у ортогонально армированного. По мере возрастания угла несоосности значения напряжений σ_0^α и $\sigma_{0/90}^\alpha$ уменьшаются. При этом $\sigma_0^{45^\circ} \approx \sigma_{0/90}^{45^\circ}$ при $\alpha = 45^\circ$. С увеличением угла α от 45 до 90° осевое напряжение $\sigma_0^\alpha \cos \alpha$ в однонаправленном композите уменьшается, а осевое напряжение $\frac{1}{2} \sigma_0^0 (\cos \alpha + \sin \alpha)$ в ортогонально армированном композите возрастает и оказывается больше, чем в однонаправленном.

Зависимость прочности при растяжении и изгибе с изменением угла несоосности $\alpha = 0—90^\circ$ приведена на рис. 4—*a* и *б* соответственно. При $\alpha = 0$ и 180° волокна в однонаправленном композите ориентированы

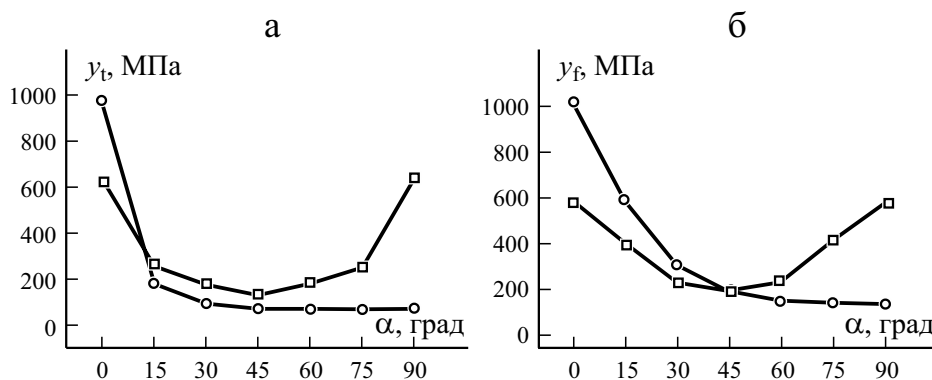


Рис. 4. Зависимость прочности при растяжении y_t (а) и изгибе y_f (б) как функция угла несоосности α для однонаправленного (0° , \circ) и ортогонально армированного ($0^\circ/90^\circ$, \square) композитов.

в направлении действия осевого напряжения и воспринимают основную часть приложенной нагрузки. Поскольку прочность непрерывных волокон S-стекла (~ 3000 МПа) намного больше, чем смолы (~ 60 МПа), прочность при растяжении и изгибе однонаправленного композита максимальна при $\alpha = 0^\circ$. При $\alpha = 90^\circ$ направление армирующих волокон перпендикулярно направлению осевого напряжения в однонаправленном композите и его прочность при растяжении и изгибе минимальна.

Для лучшего понимания поведения при изгибе однонаправленного и ортогонально армированного композитов, используя условие периодичности, вывели уравнения, аппроксимирующие зависимости их прочности при изгибе:

$$y_{f,0}(\alpha) = A\sqrt{\cos^2 \alpha} + B\sqrt{\sin^2 \alpha} + C, \quad (1)$$

$$y_{f,0/90}(\alpha) = A\sqrt{\cos^2 2\alpha} + B\sqrt{\sin^2 2\alpha} + C, \quad (2)$$

где $y_{f,0}(\alpha)$ и $y_{f,0/90}(\alpha)$ — прочность при изгибе как функции угла α ; A, B, C — постоянные. Путем аппроксимации зависимостей прочности при изгибе, показанных на рис. 4—б, получены уравнения для однонаправленного и ортогонально армированного композитов

$$y_{f,0}(\alpha) = -486,7\sqrt{\cos^2 \alpha} - 1372,3\sqrt{\sin^2 \alpha} + 1512,1, \quad (3)$$

$$y_{f,0/90}(\alpha) = 30,1\sqrt{\cos^2 2\alpha} - 352,1\sqrt{\sin^2 2\alpha} + 549,9. \quad (4)$$

Значения прочности при растяжении и изгибе ортогонально армированного композита максимальны при $\alpha = 0$ и 90° соответственно, а минимальны — при $\alpha = 45^\circ$. Прочность при растяжении ортогонально армированного композита как функция угла α описывается уравнением

$$y_{t,0/90}(\alpha) = A\sqrt{\cos^2 2\alpha} + B\sqrt{\sin^2 2\alpha} + C, \quad (5)$$

подгонка которого к экспериментальным данным дала уравнение

$$y_{t,0/90}(\alpha) = -54,6\sqrt{\cos^2 2\alpha} - 554,6\sqrt{\sin^2 2\alpha} + 685,6. \quad (6)$$

Экспериментальные результаты показали, что уравнение (6) можно использовать для определения прочности при растяжении ортогонально армированного композита при разных значениях угла несоосности α . При приближении к $\alpha = 45^\circ$ прочность композита стремится к 131 МПа.

Распределение изгибного напряжения в однонаправленном и ортогонально армированном композитах с разным углом несоосности α , рассчитанное с помощью программного обеспечения COMSOL, представлено на рис. 5. Как и предполагали, при $\alpha = 0^\circ$ деформация однонаправленного композита меньше, чем ортогонально армированного, а при $\alpha = 90^\circ$ — намного больше. В частности, при $\alpha = 45^\circ$ деформация однонаправленного композита очень близка к таковой у ортогонально армиро-

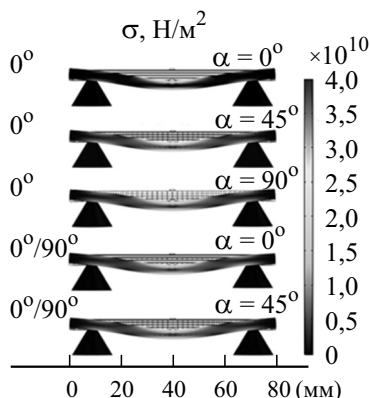


Рис. 5. Расчетное распределение напряжений в однонаправленном (0°) и ортогонально армированном ($0^\circ/90^\circ$) композитах соответственно.

ванного композита, что согласуется с экспериментальными результатами (см. рис. 4—б) и подтверждает достоверность результатов расчета.

При изменении $\alpha = 0\text{—}15^\circ$, $15\text{—}30^\circ$, $30\text{—}45^\circ$ прочность при растяжении однонаправленного композита уменьшилась на 64,0, 37,4, 9,8% соответственно. Наибольшее снижение прочности при растяжении наблюдали при увеличении α от 0 до 15° .

Из данных рис. 4 видно, что максимальные значения прочности при растяжении и изгибе однонаправленного композита больше, чем ортогонально армированного, а минимальные — меньше. Таким образом, можно сделать вывод о том, что угол несоосности существенно влияет на прочность при растяжении и изгибе однонаправленного композита и его механическая стабильность слабее, чем ортогонально армированного. Поэтому последний лучше подходит для инженерного применения.

2.2. Влияние угла несоосности на прочность при межслойном сдвиге. Результаты испытания показали, что прочность при межслойном сдвиге y_{sh} ортогонально армированного композита при угле несоосности $\alpha = 0, 15, 30, 45^\circ$ равна 20,3, 20,96, 22,34, 24,7 кДж/м² соответственно.

Прочность при межслойном сдвиге y_{sh} характеризует в основном межповерхностное сцепление волокон с матрицей. Распределение напряжений в ортогонально армированном композите существенно зависит от угла несоосности. При $\alpha = 0^\circ$ в направлении действия осевого напряжения ориентировано 50% волокон, а остальные перпендикулярны, и поэтому вклад волокон в осевое напряжение наименьший. В этом случае прочность при межслойном сдвиге зависит в основном от межповерхностного сцепления волокон с матрицей. Чем больше напряжение сцепления, тем больше прочность при сдвиге. Наибольшее значение прочности при межслойном сдвиге продемонстрировал образец ортогонально армированного композита с углом несоосности $\alpha = 45^\circ$.

На рис. 6 представлены фотографии образцов ортогонально армированного композита с разным углом несоосности после испытаний на

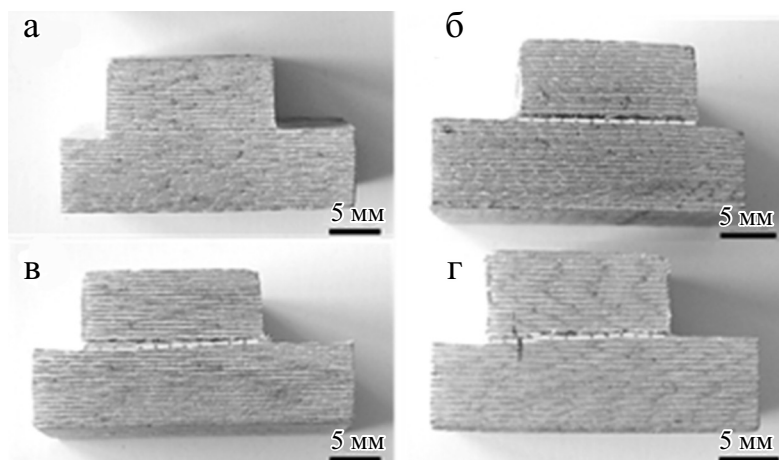


Рис. 6. Фотографии ортогонально армированного композита с разным углом несоосности α : исходный образец, $\alpha = 0^\circ$ (а); образцы после испытания, $\alpha = 0$ (б), 30 (в), 45° (г). Пояснения в тексте.

межслойный сдвиг. Видно, что поверхность растрескивания в образце при $\alpha = 0^\circ$ отчетливая (рис. 6—б) и в основном образуется на границе раздела соседних слоев волокон, а поверхность волокон полностью отделена. При $\alpha = 30$ и 45° поверхность растрескивания образцов пересекает слои волокон и разрушает часть волокон (см. рис. 6—в, г). При $\alpha = 0^\circ$ волокна в ортогонально армированном композите остаются непрерывными и почти не подвержены разрушению (рис. 7—а). Повреждение композита связано в основном с растрескиванием смолы между слоями волокон. После испытания в образцах с $\alpha = 30$ и 45° видно много разрушенных волокон (см. рис. 10—б, в), свидетельствующих о том, что разрушение в ходе испытания произошло путем пересечения слоя волокон в композите.

2.3. Влияние угла несоосности на прочность при смятии болтовых соединений. Прочность при смятии болтовых соединений y_b — это от-

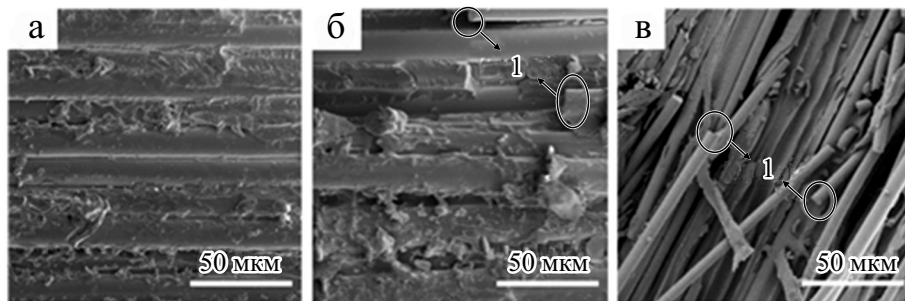


Рис. 7. Изображения сканирующего электронного микроскопа образцов ортогонально армированного композита: исходный, $\alpha = 0^\circ$ (а); после испытаний, $\alpha = 30$ (б); 45° (в). 1 — разрыв.

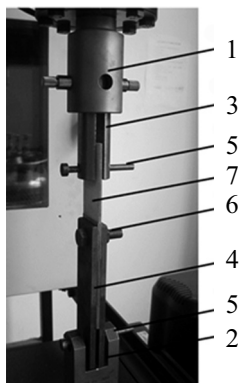


Рис. 8. Экспериментальная установка для определения прочности при смятии болтового соединения: 1 и 2 — верхний и нижний захваты соответственно; 3 и 4 — верхние и нижние зажимные щёки; 5 — затягивающий болт и гайка; 6 — фиксирующий болт и гайка; 7 — образец.

ношение разрушающей нагрузки выдавливания к площади выдавливания. Поскольку на практике для крепления композитов часто используют болты, в настоящей работе изучали также прочность при смятии болтовых соединений ортогонально армированных композитов. На рис. 8 представлена фотография установки для определения прочности при смятии болтовых соединений. При проведении эксперимента образец закрепляли болтами и гайками. К одному концу образца прикладывали растягивающую нагрузку. Полученные результаты представлены на рис. 9. Видно, что распределение прочности при смятии болтовых соединений в диапазоне $\alpha = 0\text{--}90^\circ$ симметрично относительно значения 45° . При изменении $\alpha = 0\text{--}45^\circ$ прочность при смятии сначала возрастала от 165,4 до 208,6 МПа, а затем уменьшалась с увеличением угла несоосности. На вставке показано

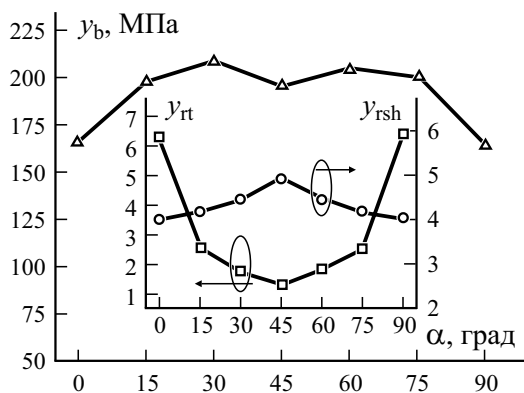


Рис. 9. Зависимость прочности при смятии y_b болтовых соединений ортогонально армированного композита как функция угла несоосности α (Δ). На вставке: зависимость относительной прочности при растяжении y_{rt} (\square) и сдвиге y_{rsh} (\circ).

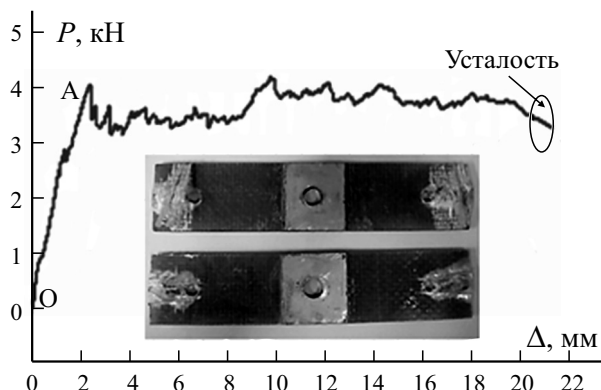


Рис. 10. Зависимость нагрузка—перемещение $P—\Delta$ однонаправленного композита и фотографии образцов ортогонально армированного композита с $\alpha = 0^\circ$ после испытаний.

относительное изменение прочности при растяжении y_{rt} и сдвиге y_{rsh} . Видно, что прочность при растяжении постепенно уменьшалась в диапазоне $\alpha = 0—45^\circ$, а прочность при межслойном сдвиге возрастала.

На рис. 10 представлена зависимость нагрузка—перемещение $P—\Delta$ образца однонаправленного композита с $\alpha = 0^\circ$. На участке OA образец деформировался линейно-упруго, а по достижении точки A наблюдали площадку текучести при почти постоянной нагрузке. На вставке представлены типичные изображения ортогонально армированного композита с $\alpha = 0^\circ$ после испытаний. Видно, что композит может выдерживать большие деформации (до 35%). Разрушение образца включает межслойное разрушение композита и разрушение волокон, что хорошо согласуется с результатами, показанными на рис. 9. Полученные результаты свидетельствуют о том, что прочность при смятии болтовых соединений связана не только с прочностью волокон и смолы, но и с межфазными свойствами между волокнами и полимерной матрицей.

Заключение

Механические свойства композитов существенно зависят от типа укладки и угла несоосности.

Прочность при растяжении однонаправленного композита при увеличении угла несоосности $\alpha = 0—90^\circ$ уменьшилась с 974,4 до 74,1 МПа, а прочность при изгибе — с 1025,4 до 139,8 МПа. Прочность при растяжении ортогонально армированного композита при увеличении угла несоосности от 0 до 45° уменьшилась с 631 до 131 МПа, а прочность при изгибе — с 580 до 190 МПа. В целом ортогонально армированный композит продемонстрировал лучшую механическую стабильность, чем однонаправленный.

При увеличении угла несоосности 0 до 45° прочность ортогонально армированного композита при межслойном сдвиге возрастала. При $\alpha = 45^\circ$ значение прочности при межслойном сдвиге, равное $24,7 \text{ кДж/м}^2$, примерно на 21,6% больше, чем при $\alpha = 0^\circ$.

Прочность при смятии болтовых соединений ортогонально армированного композита возрастала с увеличением угла несоосности от 0 до 45° , достигнув максимального значения 208,6 МПа при $\alpha = 30^\circ$.

Установлено, что угол несоосности оказывает существенное влияние на прочность при растяжении и изгибе и меньшее — на прочность при межслойном сдвиге и прочность при смятии болтовых соединений. Поэтому на практике для получения лучших механических свойств рекомендуется использовать ортогонально армированные композиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karger-Kocsis J., Mahmood H., and Pegoretti A.* Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites // *Prog. Mater. Sci.* — 2015. — Vol. 73. — P. 1—43.

2. *Kharrazadeh M., Shokrieh M. M., and Salamat-Talab M.* Effect of interface fiber angle on the model delamination growth of plain woven glass fiber-reinforced composites // *Theor. Appl. Fract. Mech.* — 2018. — Vol. 98. — P. 1—12.

3. *Li S. B., Hu B. X., and Zhang F.* Preparation and properties of glass fiber/plant fiber reinforced cementitious composites // *Sci. Adv. Mater.* — 2018. — Vol. 10. — P. 1028—1035.

4. *Sugiman S., Gozali M. H., and Setyawan P. D.* Hygrothermal effects of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin composites aged in steady and fluctuation conditions // *Adv. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 28, No. 1. — P. 87—102.

5. *Thomason J. L., Yang L., and Meier R.* The properties of glass fibres after conditioning at composite recycling temperatures // *Composites: Part A.* — 2014. — Vol. 61. — P. 201—208.

6. *Islam M. N., Ar-Rashid H, Islam F., Karmaker N., Koly F. A., Mahmud J., Keya K. N., and Khan R. A.* Fabrication and characterization of E-glass fiber reinforced unsaturated polyester resin based composite materials // *Nano Hybrids and Composites.* — 2019. — Vol. 24. — P. 1—7.

7. *Jing M. F., Che J. J., Xu S. M., Liu Z. W., and Fu Q.* The effect of surface modification of glass fiber on the performance of poly (lactic acid) composites: Graphene oxide vs. silane coupling agents // *Appl. Surf. Sci.* — 2018. — Vol. 435. — P. 1046—1056.

8. *Li H., Richards C., and Watson J.* High-performance glass fiber development for composite applications // *Int. J. Appl. Glass Sci.* — 2014. — Vol. 5. — P. 65—81.

9. *Lobanov D. S., Babushkin A. V., and Luzenin A. Yu.* Effect of increased temperatures on the deformation and strength characteristics of a GFRP based on a fabric of volumetric weave // *Mech. Compos. Mater.* — 2018. — Vol. 54, No. 5. — P. 655—664.

10. *Radzuan N. A. M., Sulong A. B., Hui D., and Verma A.* Electrical conductivity performance of predicted modified fibre contact model for multi-filler polymer composite // *Polymers.* — 2019. — Vol. 11, No. 9. — P. 1425.

11. *Anjang A., Mouritz A. P., and Feih S.* Influence of fibre orientation on the tensile performance of sandwich composites in fire // *Composites: Part A.* — 2017. — Vol. 100. — P. 342—351.

12. *Fortin G. Y., Elbadry E. A., and Hamada H.* Crashworthiness of cardboard panels reinforced with braided glass fiber rods for vehicle side impact protection // *J. Reinf. Plast. Comp.* — 2018. — Vol. 37, No. 23. — P. 1387—1401.

13. *Dangtungee R., Somchua S., and Siengchin S.* Recycling glass fiber/epoxy resin of waste printed circuit boards: Morphology and mechanical properties // *Mech. Compos. Mater.* — 2012. — Vol. 48, No. 3. — P. 325—330.

14. *Kumara N. S., Kumarb G. V., Kumarc C. V., and Prabhud M.* Experimental investigation on mechanical behavior of E-glass and S-glass fiber reinforced with polyester resin // *SSRG Int. J. Mech. Eng.* — 2018. — Vol. 5, No. 5. — P. 19—26.

15. *Bulut M., Alsaadi M., and Erkliğ A.* A comparative study on the interlaminar shear strength of S-glass/epoxy composites containing borax, perlite and sewage sludge ashparticles // *Mater. Res. Express.* — 2019. — Vol. 6. — P. 095330.

16. *Anjang A., Mouritz A. P., and Feih S.* Influence of fibre orientation on the tensile performance of sandwich composites in fire // *Composites: Part A.* — 2017. — Vol. 100. — P. 342—351.

17. *Guo Z. R., Chen W. N., and Zheng J.* Improved quasi-static twin-fiber transverse compression of several high-performance fibers // *Text. Res. J.* — 2018. — Vol. 89, No. 9. — P. 1595—1613.

18. *Zhang S. H., Caprani C., and Heidarpour A.* Influence of fibre orientation on pultruded GFRP material properties // *Compos. Struct.* — 2018. — Vol. 204. — P. 368—377.

19. *Boufaïda Z., Farge L., André S., and Meshaka Y.* Influence of the fiber/matrix strength on the mechanical properties of a glass fiber/thermoplastic-matrix plain weave fabric composite // *Composites: Part A.* — 2015. — Vol. 75. — P. 28—38.

20. *Klasztorny M., Nycz D. B., Romanowski R. K., Gotowicki P., Kiczko A., and Rudnik D.* Effects of operating temperatures and accelerated environmental aging on the mechanical properties of a glass-vinylester composite // *Mech. Compos. Mater.* — 2017. — Vol. 53, No. 3. — P. 335—350.

21. *Feih S., Boiocchi E., Mathys G., Mathys Z., Gibson A. G., and Mouritz A. P.* Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres // *Composites: Part B.* — 2011. — Vol. 42, No.3. — P. 350—358.

22. *Shokrieh M. M., Salamat-talab M., and Heidari-Rarani M.* Effect of interface fiber angle on the R-curve behavior of E-glass/epoxy DCB specimens // *Theor. Appl. Fract. Mech., Part B.* — 2016. — Vol. 86. — P. 153—160.

23. *Erkliğ A., Bulut M., and Fayzulla B.* Toughening effect of microscale particles on the tensile and vibration properties of S-glass-fiber-reinforced epoxy composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2018. — Vol. 54. — P. 119—128.

24. *Martina B., Kateřina K., Miloslava R., Jan G., and Ruta M.* Oxycellulose: Significant characteristics in relation to its pharmaceutical and medical applications // *Adv. Polym. Technol.* — 2009. — Vol. 28. — P. 199—208.

25. *Latha P. S., Rao M. V., Kumar W. K., Raghavendra G., and Ojha S. Ramu inala,* Evaluation of mechanical and tribological properties of bamboo-glass hybrid fiber reinforced polymer composite // *J. Ind. Text.* — 2016. — Vol. 46. — P. 3—18.

26. *Wilhelmsson D., Mikkelsen L. P., Fæster S., and Asp L. E.* X-ray tomography data of compression tested unidirectional fibre composites with different off-axis angles // *Data in Brief.* — 2019. — Vol. 25. — P. 104263.

27. *Marín J. C., Justo J., Barroso A., Cañas J., and París F.* On the optimal choice of fibre orientation angle in off-axis tensile test using oblique end-tabs: Theoretical and experimental studies // *Compos. Sci. Technol.* — 2019. — Vol. 178. — P. 11—25.

28. *Wilhelmsson D., Mikkelsen L. P., Fæster S., and Asp L. E.* Influence of in-plane shear on kink-plane orientation in a unidirectional fibre composite // *Composites: Part A.* — 2019. — Vol. 119. — P. 283—290.

29. *Sherif G., Chukov D., Tcherdyntsev V., and Torokhov V.* Effect of formation route on the mechanical properties of the polyethersulfone composites reinforced with glass fibers // *Polymers.* — 2019. — Vol. 11, No. 8. — P. 1364.

30. *Chen J., Zhao D., Jin X., Wang C. C., Wang D. Z., and Ge H. Y.* Modifying glass fibers with graphene oxide: Towards high-performance polymer composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2014. — Vol. 97. — P. 41—45.

31. *Yang L., Thomason J. L., and Zhu W.* The influence of thermo-oxidative degradation on the measured interface strength of glass fibre-polypropylene // *Composites: Part A.* — 2011. — Vol. 42. — P. 1293—1300.

32. *Harinath P. N. V., Bramhe S., Surendran D., Sabane V., Singh A., NamKim T., Sharbidre R., Cheol B. J., Peters L., Bersee H., Nanda H., and Balakrishnan A.* Analysis of microstructural, thermal and mechanical properties of unidirectional glass fiber fabrics exhibiting sizing migration // *Composites: Part B.* — 2019. — Vol. 164. — P. 570—575.

33. *James L. T., Nagel U., Liu Y., and David B.* A study of the thermal degradation of glass fibre sizings at composite processing temperatures // *Composites: Part A.* — 2019. — Vol. 121. — P. 56—63.

Поступила в редакцию 22.04.2020

Окончательный вариант поступил 22.12.2020

Received Apr. 22, 2020 (Dec. 22, 2020)
