

A. Мирзаэй, А. Х. Дарбанди, С. Х. Тагавиан*

*Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology,
Tehran, Iran*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ Z-ШТИФТОВ С НАНЕСЕННЫМ АДГЕЗИВОМ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ВНАХЛЕСТКУ¹

A. Mirzaei, A. H. Darbandi, and S. H. Taghavian*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ADHESIVE-IMPREGNATED PINS ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF z-PINNED LAP SHEAR JOINTS

Keywords: z-pinned joints, shear strength, lap shear joint, bonding

The paper illustrates the effect of applying an adhesive to pins on the mechanical properties of z-pinned joints. Three types of lap shear specimens were made for this investigation. Their mechanical properties were determined and compared. Results showed that the impregnation of pins significantly increased the shear strength of lap shear specimens.

Ключевые слова: соединения z-штифтовые, прочность сдвиговая, соединение внахлестку, склейка

Оценено влияние нанесения адгезива на z-штифты на механические свойства соединений внахлестку. Изготовлено три типа образцов соединения внахлестку. Определены и сопоставлены их механические свойства. Результаты показали, что обработка штифтов адгезивом значительно увеличивает сдвиговую прочность соединения внахлестку.

*Автор, с которым следует вести переписку: amin_mirzaei@mut.ac.ir
Corresponding author: amin_mirzaei@mut.ac.ir

¹Перевод с англ.

Введение

Склеивание отдельных панелей и соединение отдельно изготовленных компонентов — стандартная практика для композитных конструкций. Существует множество применений, в которых панели из слоистых композитов склеивают в области соединения с помощью надлежащего адгезива. Одно из таких приложений — транспортное машиностроение. Адгезионное соединение используют при ремонте конструкций с применением композитных заплаток для предотвращения дополнительного повреждения [1].

При соединении композитных деталей используют клеевые и механические гибридные соединения для увеличения их прочности, улучшения усталостных характеристик, уменьшения массы и концентрации напряжений.

Согласно недавним исследованиям при изготовлении гибридных соединений композит—композит или композит—металлическая деталь можно использовать только ограниченное количество винтов или штифтов диаметром от нескольких миллиметров [2—6] до нескольких нанометров [7—13]. В связи с этим выполнено много исследований соединений с z-штифтами. В данном типе гибридных соединений цилиндрические штифты диаметром от 0,1 до 1 мм вставляют по толщине пластины из слоистого композита для предотвращения ее расслоения. Исследователи пытались улучшить характеристики соединения, выбирая подходящий адгезив и конфигурацию штифтов.

В [14] для изготовления клеевых соединений с двойной нахлесткой использовали маленькие шпильки диаметром 0,8 мм с полусферической головкой и без нее. Результаты показали, что статическая прочность образцов со шпильками с полусферическими головками и без них возросла на 52 и 11% соответственно по сравнению с таковой простого клеевого соединения. В [15] разработали усовершенствованный ультразвуковой способ введения z-штифтов для упрочнения Т-образных соединений из эпоксидного углепластика. Результаты показали, что прочность при отрыве Т-образных соединений можно увеличить на 70%, используя штифты диаметром 0,5 мм, распределенные с плотностью 4% по длине соединения. В [16] использовали трехмерные модели прогрессирующего повреждения для предсказания механизма разрушения пластин из слоистых композитов, отремонтированных с помощью заплаток, закрепленных штифтами. В [17] оценили влияние гибких штифтов диаметром 0,3 мм на прочность и допустимую повреждаемость соединений внахлестку полимерный композит—металл. Результаты показали, что в зависимости от количества и местоположения штифтов прочность соединений можно увеличить на 58%. В [18] экспериментально исследовали влияние z-штифтового соединения внахлестку композит—композит и установили, что использование стальных штифтов диаметром 1 мм повысило прочность и ударную вязкость соединения на 16,21 и 55,6% соответственно, а модуль упругости соединения уменьшился на 11,1%.

В некоторых исследованиях рассматривали использование z-штифтов для торможения распространения трещин [19, 20]. В [21] изучали использование z-штифтов для торможения распространения трещин при испытании образцов с соединением внахлестку и установили, что остаточная нагрузка после остановки распространения трещины составляет 250% от предельной, надежно выдерживаемой z-штифтами, а нагрузка задержки трещин на 33% больше предельной статической нагрузки контрольных соединений без z-штифтов.

В [22] представлен новый метод соединения двойной нахлесткой отвержденных слоистых эпоксидных углепластиков с помощью стальных z-штифтов диаметром 1 мм и экспериментально оценены свойства соединений при растяжении. Следует отметить, что преимущество данного метода по сравнению с введением z-штифтов в область соединения неотвержденных композитов заключается в том, что не образуется область с большим содержанием смолы и не происходит смещение армирующих волокон. Этот метод также использовали в настоящей работе при изготовлении соединений волокнисто-армированного стеклопластика внахлестку для экспериментального исследования влияния нанесения адгезива на z-штифты. Образцы изготовили в соответствии со стандартом ASTM D5868, а затем z-штифты с нанесенным адгезивом внедрили в области склеивания. Механические свойства образцов сравнили с таковыми образцов без штифтов и образцов с z-штифтами, не обработанными адгезивом. Кроме того, изучили поверхности и моды разрушения соединений.

1. Материалы и методы

1.1. Материалы. Склеиваемые композиты изготовили методом ручной укладки 18 слоев двунаправленной ($[0^\circ/90^\circ]$) ткани из волокон E-стекла и пропитки эпоксидным связующим в вакуумном мешке. Общая толщина композитов ~ 3 мм. Использовали стеклоткань полотняного переплетения с поверхностной плотностью 200 г/м^2 . В качестве матрицы использовали эпоксидную смолу Araldite LY 5052 и отвердитель Aradur 5052 при массовом соотношении 100:38. Образцы отверждали при комнатной температуре в течение одного дня, а затем в течение 8 ч в печи при температуре 80°C . Массовое содержание стекловолокон в композите, равное 67,53%, определили по стандарту ASTM D3171. Механические свойства эпоксидного стеклопластика, определенные в ходе испытания пяти образцов по стандарту ASTM D3039, следующие: продольный модуль Юнга 25 ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_{xy} = 0,2$, предел прочности при продольном растяжении 380 МПа, предельное продольное удлинение 8,3%. Механические свойства эпоксидной матрицы, определенные по стандарту ASTM D638, следующие: модуль Юнга 3425 МПа, коэффициент Пуассона $\nu_{xy} = 0,35$, предел прочности при растяжении 72,63 МПа, предельное удлинение 3,31%.

Для изготовления образцов с соединением внахлестку использовали двухкомпонентный адгезив ADEKIT H9940 Sika. Компоненты смолы и

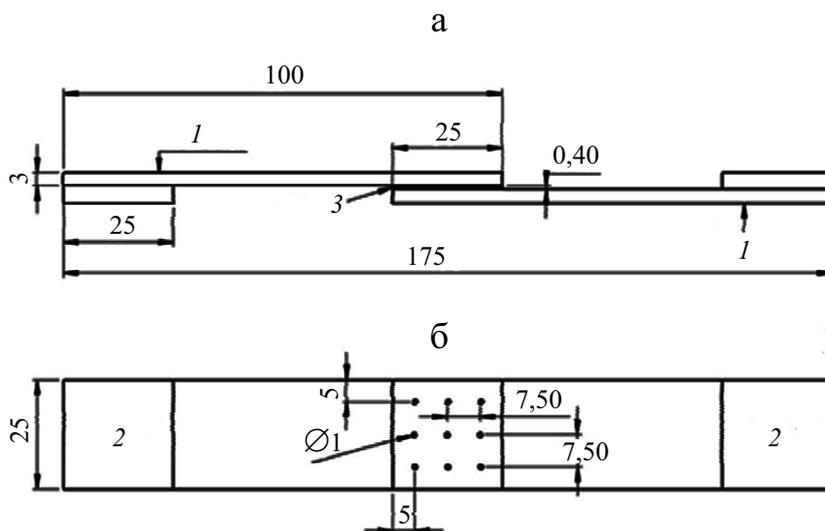


Рис. 1. Геометрия и размеры (в миллиметрах) простого (а) и z-штифтового (б) соединений внахлестку: 1 и 2 — адгерент и накладка из стеклопластика соответственно; 3 — адгезив.

отвердителя смешивали в массовом соотношении 100:90, соединения отверждали в течение одной недели при температуре 25 °С. Механические свойства адгезива, определенные по стандарту ASTM D638, следующие: модуль Юнга $E_{11} = 2,234$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,35$, предел текучести 22,42 МПа, предельное удлинение 1,58%.

Упрочняющие z-штифты изготовлены из высоколегированной стали AISI52100 с модулем Юнга $E = 201,3$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,27$, пределом текучести $\sigma_y = 1410$ МПа, пределом прочности при разрушении $\sigma_f = 1510$ МПа, разрушающей деформацией $\epsilon_f = 0,16\%$ [23].

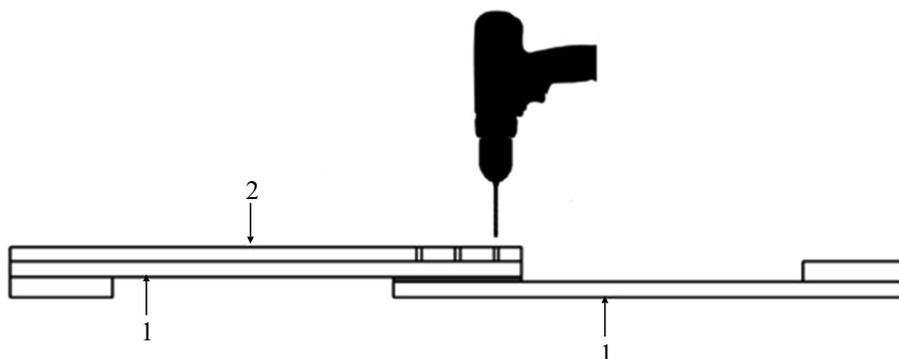


Рис. 2. Схема высверливания отверстий: 1 — адгерент из стеклопластика; 2 — оргстекло.

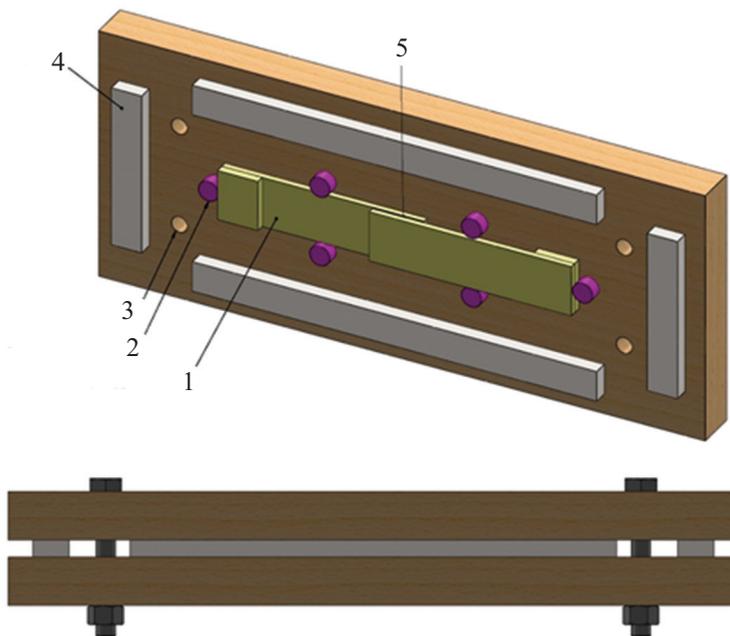


Рис. 3. Схема открытого и закрытого приспособления: 1 — адгерент из стеклопластика; 2 — круглый барьер; 3 — болтовое отверстие; 4 — прокладка; 5 — адгезив.

1.2. Изготовление образцов для испытаний. Изготовили три типа соединений внахлестку (рис. 1): T1 — с простым клеевым соединением, T2 и T3 — с клеевым соединением и девятью упрочняющими z-штифтами, не обработанными и обработанными адгезивом соответственно. z-Штифты внедрили с шагом 7,5 мм в продольном и поперечном направлении на расстоянии 5 мм от свободных кромок (см. рис. 1—б). z-Штифты вставили в отверстия диаметром 1 мм, просверленные в области соединения с помощью зажимного приспособления из оргстекла и ручного сверлильного станка (рис. 2) Использовали спиральное сверло из быстрорежущей стали с покрытием из карбида вольфрама.

Геометрические размеры адгерентов (склеиваемых образцов стеклопластика) 100×25 мм², длина нахлестки в зоне склеивания 25 мм (согласно стандарту ASTM D5868-01), толщина склейки 0,4 мм. Один из ключевых моментов изготовления соединений внахлестку — поверхностная обработка адгерентов. Установлено, что обработка поверхности играет важную роль в повышении прочности и долговечности соединения. Более того, каждый адгезионный материал требует разных видов обработки поверхности для обеспечения правильного баланса между прочностью и модой разрушения соединений. Таким образом, склеиваемые поверхности стеклопластиков подвергли обработке согласно стандарту ASTM D2093.

Для управления толщиной адгезива и соосностью адгерентов использовали простое приспособление (см. рис. 3), имеющее несколько круглых барьеров, препятствующих вращению адгерентов, и четыре подкладки,

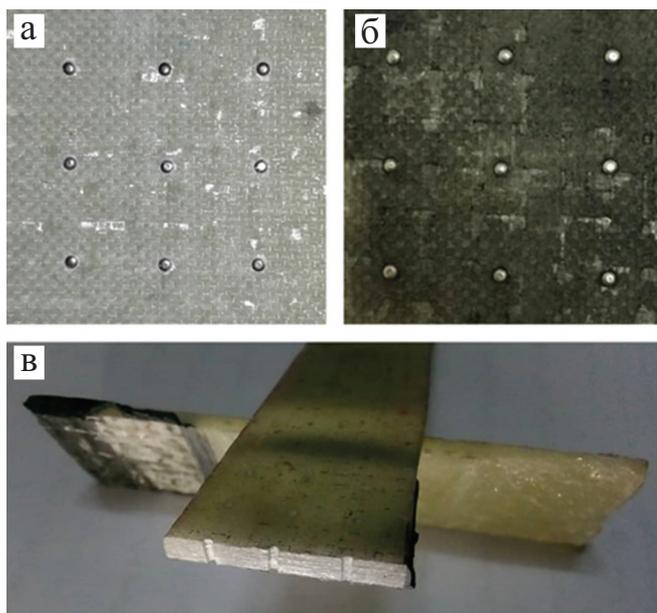


Рис. 4. Область склейки соединений типа T2 (а) и T3 (б) и поперечное сечение с просверленными отверстиями (в).

обеспечивающих требуемую толщину адгезива. Как уже было указано, адгезив отверждали в течение одной недели при температуре 25 °С; в течение первых суток все образцы оставили в изготавливаемом приспособлении.

Для уменьшения эксцентриситета приложенной растягивающей нагрузки и устранения дополнительного изгибающего момента в соединении внахлестку к концам образцов приклеили накладки из такого же эпоксидного стеклопластика. Внецентренный изгиб обусловил большие напряжения отслоения и неравномерные сдвиговые напряжения в слое адгезива. Образцы соединений типа T2 и T3 показаны на рис. 4—а, б.



Рис. 5. Образец в испытательной машине.

Влияние z-штифтов на средние значения предельной нагрузки P_{ult} , предельное удлинение u_{ult} и сдвиговую жесткость E_{ult} соединений внахлестку

Тип соединения	P_{ult} , Н	V^*	Δ^{**} , %	u_{ult} , мм	V	Δ , %	E_{ult} , кН/мм	V	Δ , %
T1	6380,8	0,038	—	0,362	0,001	—	22,718	0,030	—
T2	7087,1	0,144	11,07	0,387	0,169	6,9	21,596	0,061	-4,94
T3	8965,1	0,003	40,5	0,605	0,150	67,13	20,720	0,062	-8,8

* V — коэффициент вариации.

** Δ — увеличение по сравнению с соединением типа T1.

Поперечное сечение просверленных отверстий в одном из адгерентов в области нахлестки показано на рис. 4—6.

1.3. Процедура нагружения. Испытания соединений на растяжение по стандарту ASTM D5868 провели на универсальной испытательной машине SANTAM STM-150 при комнатной температуре, контролируя скорость перемещения 1,3 мм/мин. Условия закрепления образцов в захватах машины проиллюстрированы на рис. 5. Деформацию измеряли экстензометром и записывали диаграммы нагрузка—перемещение $P—\delta$. Испытали по три образца каждого типа соединений.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Несущая способность. Как видно из данных таблицы, предельная нагрузка и удлинение гибридных соединений возросли. Очевидно, это увеличение обусловлено мостиковым эффектом z-штифтов, передающих сдвиговые напряжения, несмотря на наличие трещин. Сдвиговая жесткость гибридных соединений типа T2 и T3 уменьшилась в силу сдвигового потока

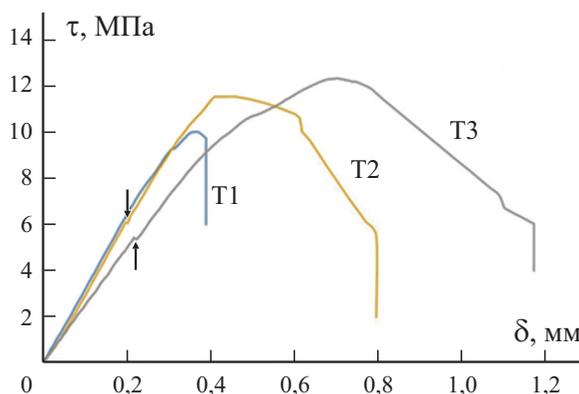


Рис. 6. Диаграммы среднее сдвиговое напряжение—перемещение $\tau—\delta$ соединений типа T1—T3 (стрелки указывают на скачок на диаграмме $\tau—\delta$).

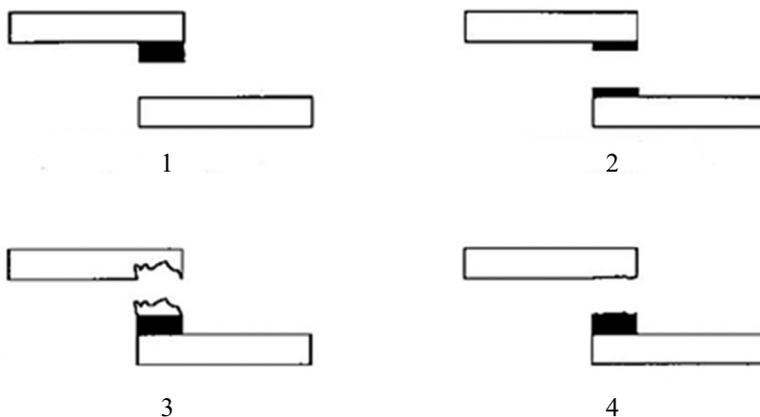


Рис. 7. Схема мод разрушения в соединениях [24]: 1 — адгезионное разрушение; 2 — когезионное разрушение; 3 — разрушение отрывом волокон; 4 — разрушение отрывом волокон вблизи поверхности адгезива.

вокруг боковой поверхности штифтов, увеличившей длину поверхности раздела склейки.

На рис. 6 приведены диаграммы сдвиговое напряжение—перемещение τ — δ образцов с простым и гибридным типом соединения. Диаграмма соединения типа Т1 возростала почти линейно до пикового напряжения, а затем произошло хрупкое разрушение в силу расслоения склейки. Как и ожидали, прочность образцов с z-штифтами, обработанными адгезивом

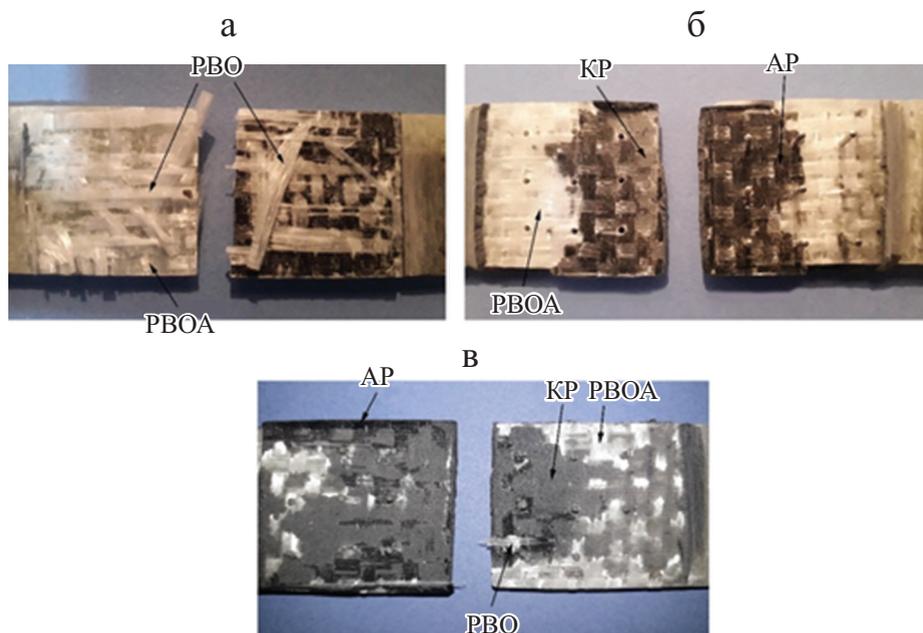


Рис. 8. Моды разрушения в соединениях типа Т1 (а), Т2 (б) и Т3 (в).

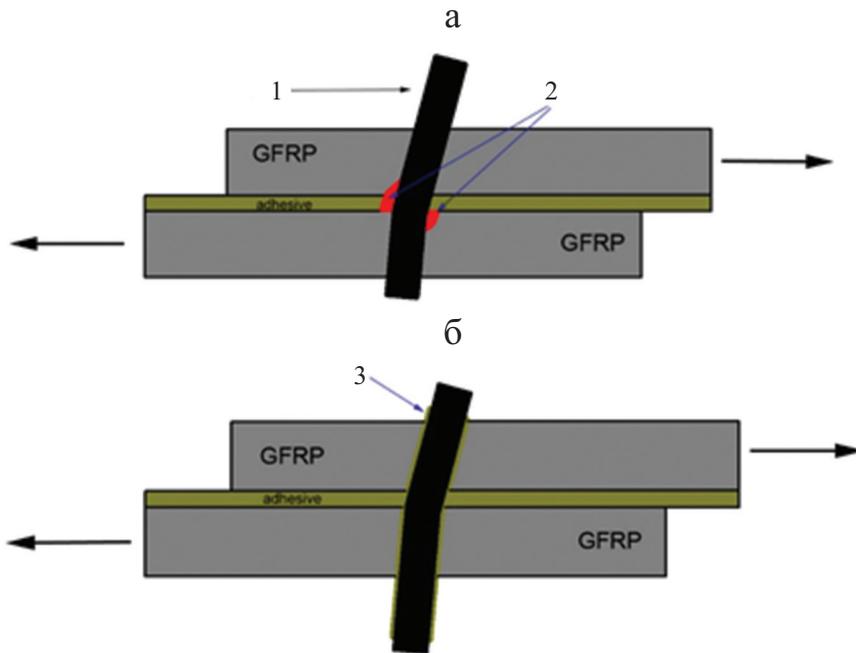


Рис. 9. Схема механизмов z-штифтового разрушения в соединениях типа Т2 (а) и Т3 (б): 1 — выдергивание штифта; 2 — повреждение смятием; 3 — адгезив.

(тип Т3), больше таковой у образцов с необработанными z-штифтами (тип Т2). Таким образом, нанесение адгезива на z-штифты, ограничивающее их перемещение, играет важную роль в увеличении несущей способности и мостиковом эффекте в области склеивания. Диаграммы деформирования соединений типа Т2 и Т3 демонстрируют небольшой скачок, связанный с раскрытием трещины расслоения. z-Штифты пере-

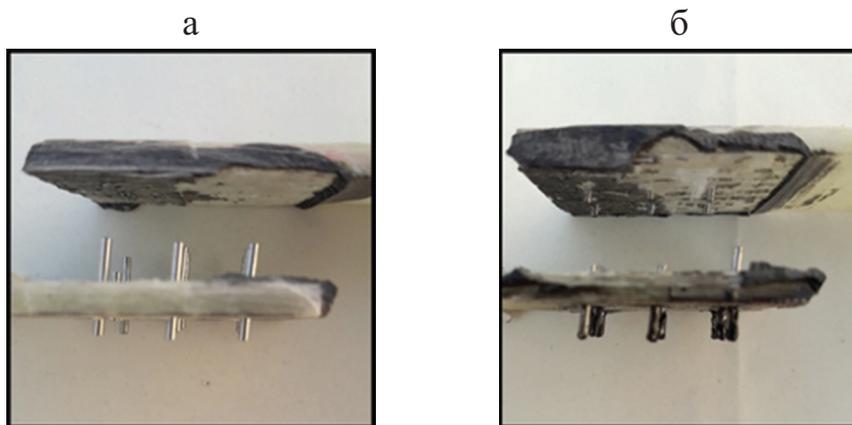


Рис. 10. Вид сбоку соединений типа Т2 (а) и Т3 (б).

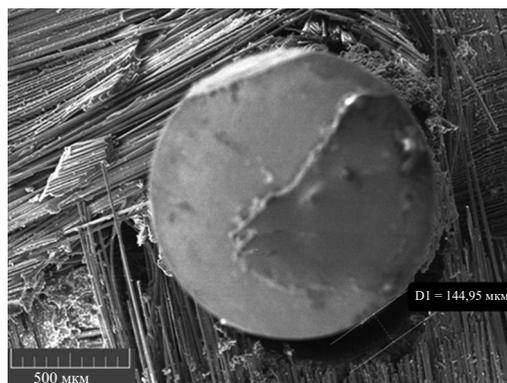


Рис. 11. Повреждение смятием в соединении типа Т2 (указано стрелкой).

крывали путь развития трещин и способствовали сопротивлению приложенной нагрузке.

2.2. Анализ разрушения области склейки. Адгезионное соединение слоистых композитов может иметь сложные моды разрушения, такие как адгезионное разрушение (АР), когезионное разрушение (КР), разрушение волокон отрывом (РВО), разрушение волокон отрывом от адгезива (РВОА) и смешанный тип разрушения в соответствии со стандартом ASTM D5573-99 (рис. 7). Эти моды зависят от распределения напряжений, связанных в свою очередь с параметрами адгезионных соединений: адгезионной прочностью, длиной склейки и упрочнением z-штифтами. На рис. 8 показаны типичные моды разрушения всех испытанных типов соединения. Видно, что использование z-штифтов изменяет моду разрушения с РВО и РВОА, характерного для соединения типа Т1, на моду КР, преобладающую у соединений типа Т2 и Т3. Это результат мостикового эффекта z-штифтов, передающих повреждение вблизи поверхности стеклопластика адгезиву,

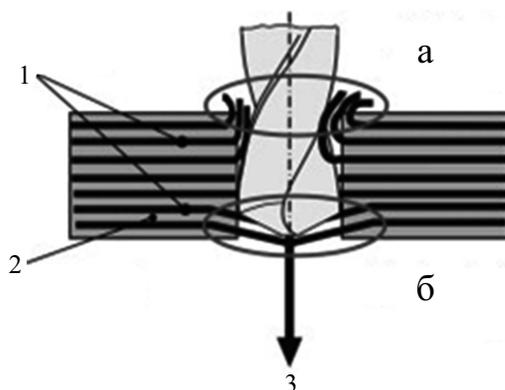


Рис. 12. Разрушение расслоением на входе (а) и выходе (б) при высверливании отверстия в волокнисто-армированном композите [25]: 1 — слои волокон; 2 — сцепление с матрицей; 3 — усилие высверливания.

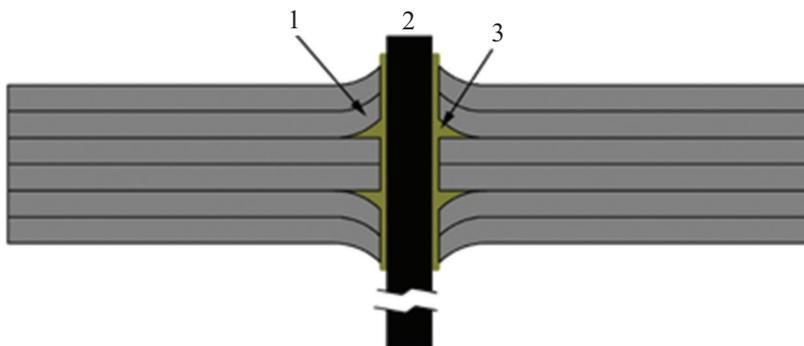


Рис. 13. Схематическое изображение адгезива вокруг z-штифта в соединении типа Т3: 1 — поврежденные слои; 2 — штифт; 3 — адгезив.

хотя моды разрушения РВО и РВОА также заметны в некоторых небольших областях.

В целом при исследовании поверхности разрушения в образцах соединений типа Т2 и Т3 наблюдали два механизма разрушения. В соединении типа Т2 при увеличении приложенной нагрузки z-штифты сначала изгибались, затем выдергивались и в конце концов разрушились в силу вращения области склеивания адгерентов. В соединении типа Т3 адгезив, нанесенный на z-штифты, предотвращал их выдергивание благодаря большей прочности соединения. Схему механизма разрушения соединений типа Т2 и Т3 с z-штифтами иллюстрируют данные рис. 9. Видно, что z-штифты согнуты и затем выдернуты из соединения типа Т2, но не выдернуты из соединения типа Т3 (рис. 10).

С помощью сканирующего электронного микроскопа более подробно изучили поверхности разрушения. Моду разрушения, возникающую в области z-штифта и отверстия в соединении типа Т2, иллюстрируют данные рис. 11. Видно, что в соединении имело место повреждение смятием.

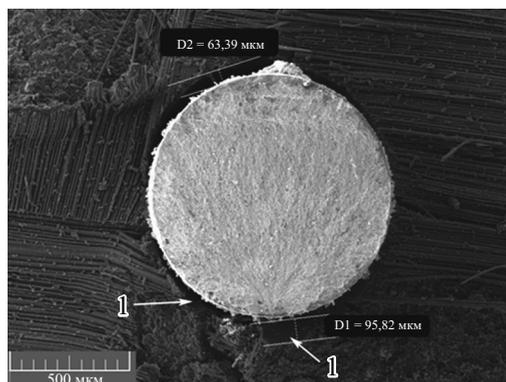


Рис. 14. Влияние адгезива (1), нанесенного на z-штифты в соединении типа Т3.

Как правило, в ходе высверливания отверстий в слоистых композитах вокруг отверстия могут возникать такие моды разрушения, как расслоение, разрыв волокон и повреждение матрицы. Кроме того, при сверлении волокнисто-армированных композитов расслоение может возникать на входе и выходе из отверстия (рис. 12) [25].

В соединении типа Т3 адгезив, нанесенный на z-штифты, может проникать в область отверстия и восстанавливать поврежденную область, повышая несущую способность соединения. Схематическое и микроскопическое изображение данного явления проиллюстрированы на рис. 13 и 14 соответственно.

Заключение

В настоящей работе экспериментально определили предельную нагрузку, удлинение, сдвиговые напряжения и несущую способность гибридных соединений. Кроме того, проанализировали области разрушения всех типов соединений внахлестку и изучили разные механизмы разрушения образцов. Следует отметить, что в данном исследовании усовершенствовали метод внедрения стальных z-штифтов в соединение внахлестку, предложенный в [22]. Полученные результаты можно резюмировать следующим образом.

— Мостиковый эффект внедренных z-штифтов увеличил предельную нагрузку образцов соединений типа Т2 и Т3 при растяжении за счет сдвигового потока вокруг боковой поверхности z-штифтов и увеличения длины поверхности раздела склейки, при этом сдвиговая жесткость соединений уменьшилась.

— Анализ зоны разрушения продемонстрировал, что вытягивание z-штифтов сыграло значительную роль в снижении прочности соединений при растяжении. Адгезив, нанесенный на z-штифты, повысил прочность соединения, предотвратив их выдергивание.

— Адгезив, нанесенный на z-штифты, проникал в области вокруг отверстий, поврежденных в ходе их высверливания, и способствовал ремонту областей, тем самым увеличивая несущую способность адгерентов и, следовательно, прочность соединений типа Т3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shang X., Marques E. A. S., Machado J. J. M., Carbas R. J. C., Jiang D., and da Silva L. F. M.* Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends // *Composites: Part B*. — 2019. — Vol. 177. — P. 107363.
2. *Fu M., and Mallick P.* Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites // *Int. J. Adhes. Adhes.* — 2001. — Vol. 21, No. 2. — P. 145—159.
3. *Kelly G.* Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints // *Compos. Struct.* — 2005. — Vol. 69, No. 1. — P. 35—43.

4. *Kweon J. H., Jung J. W., Kim T. H., Choi J. H., and Kim D. H.* Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding // *Compos. Struct.* — 2006. — Vol. 75, Nos. 1—4. — P. 192—198.
5. *Tong L.* Bearing failure of composite bolted joints with non-uniform bolt-to-washer clearance // *Composites: Part A.* — 2000. — Vol. 31, No. 6. — P. 609—615.
6. *Matsuzaki R., Shibata M., and Todoroki A.* Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method // *Composites: Part A.* — 2008. — Vol. 39, No. 2. — P. 154—163.
7. *Tong L., Jain L., Leong K., Kelly D., and Herszberg I.* Failure of transversely stitched RTM lap joints // *Compos. Sci. and Technol.* — 1998. — Vol. 58, No. 2. — P. 221—227.
8. *Chang P., Mouritz A., and Cox B.* Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension // *Compos. Sci. Technol.* — 2006. — Vol. 66, No. 13. — P. 2163—2176.
9. *Mouritz A.* Review of z-pinned composite laminates // *Composites: Part A.* — 2007. — Vol. 38, No. 12. — P. 2383—2397.
10. *Cartié D. D., Dell'Anno G., Poulin E., and Partridge I. K.* 3D reinforcement of stiffener-to-skin T-joints by Z pinning and tufting // *Eng. Fracture Mech.* — 2006. — Vol. 73, No. 16. — P. 2532—2540.
11. *Graham D., Rezai A., Baker D., Smith P. A., and Watts J. F.* The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite—metal structures // *Composites: Part A.* — 2014. — Vol. 64. — P. 11—24.
12. *Parkes P., Butler R., Meyer J. et al.* Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement // *Compos. Struct.* — 2014. — Vol. 118. — P. 250—256.
13. *Yang L., He X., and Mei L.* Interfacial shear behavior of 3D composites reinforced with CNT-grafted carbon fibers // *Composites: Part A.* — 2012. — Vol. 43, No. 8. — P. 1410—1418.
14. *Ucsnik S., Scheerer M., and Zaremba S.* Experimental investigation of a novel hybrid metal—composite joining technology // *Composites: Part A.* — 2010. — Vol. 41, No. 3. — P. 369—374.
15. *Park Y. B., Lee B. H., and Kweon J. H.* The strength of composite bonded T-joints transversely reinforced by carbon pins // *Compos. Struct.* — 2012. — Vol. 94, No. 2. — P. 625—634.
16. *Tie Y., Wang L., and Li C.* Progressive damage finite element analysis of composite laminates repaired by pinned patches // *Int. J. Computational Methods Eng. Sci. Mech.* — 2015. — Vol. 16, No. 3. — P. 213—219.
17. *Islam M. and Tong L.* Influence of pinning on static strength of co-cured metal-GFRP hybrid single lap joints // *Composites: Part A.* — 2016. — Vol. 84. — P. 196—208.
18. *Rezvaninasab M., Farhadinia M., and Mirzaei A.* Experimental evaluation of reinforcing the single lap joint in both longitudinal and transverse direction under tensile and bending condition // *Int. J. Adhes. Adhes.* — 2019. — Vol. 88. — P. 19—25.
19. *Chang P., Mouritz A., and Cox B.* Tensile strength and fatigue properties of Z-pinned composite lap joints // *Proc. Fourth Asian—Australasian Conf. on Composite Materials (ACCM 4) “Composite Technologies for 2020,” 2004.* — P. 615—620.
20. *Pingkarawat K. and Mouritz A.* Improving the mode I delamination fatigue resistance of composites using z-pins // *Compos. Sci. Technol.* — 2014. — Vol. 92. — P. 70—76.
21. *Kadlec M., Růžek R., and Bělský P.* Concurrent use of Z-pins for crack arrest and structural health monitoring in adhesive-bonded composite lap joints // *Compos. Sci. Technol.* — 2019. — P. 107967.

22. *Arnautov A., Nasibullins A., and Gribniak V.* Experimental characterization of the properties of double-lap needled and hybrid joints of carbon/epoxy composites // *Materials*. — 2015. — Vol. 8, No. 11. — P. 7578—7586.

23. *Guo Y. and Liu C.* Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel in hard machining processes // *J. Manuf. Sci. Eng.* — 2002. — Vol. 124, No. 1. — P. 1—9.

24. ASTM D5573-99, Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints. — ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2019.

25. *Faraz A. and Biermann D.* Subsequent drilling on pilot holes in woven carbon fibre reinforced plastic epoxy laminates: the effect of drill chisel edge on delamination // *Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. of Eng. Manufacture*. — 2011. — Vol. 225, No. 9. — P. 1493—1504.

Поступила в редакцию 10.11.2020

Окончательный вариант поступил 16.04.2021

Received Nov. 10, 2020 (Apr. 16, 2021)
