

А. Абиди^{а}, С. Бен Салем^{а,б}, А. Безази^в, Х. Бумедири^в*

*^аLaboratory of Applied Mechanics and Engineering (LR-MAI), National School of Engineers of
Tunis (ENIT), Tunis El Manar University, Tunisia*

^бPreparatory Institute of Engineering Mrezka Nabeul (IPEIN), Carthage University, Tunisia

*^вLaboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM), Université 8 Mai
1945, Guelma, Algeria*

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ И РЕЗКИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЕЙ НА ПОВЕДЕНИЕ ЭПОКСИДНЫХ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ¹

A. Abidi, S. Ben Salem, A. Bezazi, and H. Boumediri*

A COMPARATIVE STUDY ON THE EFFECT OF MILLING AND ABRASIVE WATER JET CUTTING TECHNOLOGIES ON THE TENSILE BEHAVIOR OF COMPOSITE CARBON/EPOXY LAMINATES

Keywords: CFRP, high-speed milling, abrasive water jet, tension, cutting process.

Tensile tests of composite materials based on carbonfiber reinforced plastics (CFRPs) have been performed to benchmark the impact of action of an abrasive water jet (AWJ) and high-speed milling (HSM) on the stiffness and strength of CFRP laminates. CFRP specimens were tested according to the ASTM D3039 and ASTM D5766. The drilled specimens exhibited a linear behavior up to failure, but their stress–strain relation was pronouncedly nonlinear, with higher tensile strains than nondrilled ones. Results showed that ultimate the stress–strain relation and Young’s modulus were affected by the machining process. The stress and strain limits for samples prepared using the AWJ method were higher than for those machined by HSM, but the opposite effect was observed for Young’s modulus.

Ключевые слова: углепластик волокнисто-армированный, измельчение высокоскоростное, струя суспензии водоабразивной, растяжение, процесс резки

*Автор, с которым следует вести переписку: adel.abidi@enit.utm.tn
Corresponding author: adel.abidi@enit.utm.tn

¹Перевод с англ.

Испытания на растяжение волокнисто-армированных углепластиков (CFRP) выполнили для оценки влияния гидроабразивной струи (ГАС) и высокоскоростного фрезерования (ВСФ) на жесткость и прочность слоистых углепластиков. Образцы углепластика испытывали по стандартам ASTM D3039 и ASTM D5766. Просверленные образцы продемонстрировали линейное поведение вплоть до разрушения, но зависимость между напряжением и деформацией этих образцов была явно нелинейной с более высокими деформациями при растяжении, чем образцов без сверления. Результаты показали, что окончательная зависимость между напряжением и деформацией и модуль Юнга зависят от способа механической обработки. Предельные значения напряжения и деформации образцов, изготовленных с помощью ГАС, больше, чем вырезанных с помощью ВСФ; для модуля Юнга наблюдали противоположный эффект.

Введение

Композитные материалы становятся неотъемлемой частью аэрокосмических конструкций. Для повышения безопасности и прочности изделий требования к летной годности требуют применения механической обработки высочайшего качества и отличных механических характеристик. Однако эти высокие требования необходимо сбалансировать с минимизацией и оптимизацией производственных затрат. Композитные изделия для сборных конструкций требуют разной механической обработки, например, резки и просверливания при их соединении. Общая тенденция в процессах производства композитов — выявление методов, обеспечивающих высочайшее качество и наиболее быструю обработку при резке композитных конструкций. Технологию гидроабразивной струи (ГАС) и процесс высокоскоростного фрезерования (ВСФ) считают одними из самых современных методов механической обработки в силу скорости резки, точности, обработки сложных форм, низких осевых нагрузок и меньших контактных температур [1, 2]. Однако большое разнообразие слоистых композитов усложняют задачу их механической обработки. Удаление материала при резке также обуславливает разные виды повреждения: расслоение, трещины в матрице и перерезанные волокна [3, 4]. Кроме того, шероховатость поверхности — еще один важный фактор для оценки качества механической обработки слоистых композитов, зависящий от способа обработки, условий резки и геометрии инструмента [5, 6]. Дефекты, возникающие при обработке, влияют на механические характеристики композитных панелей [7].

В [8] сравнили влияние на прочность и качество слоистых углепластиков традиционной механической обработки и резки с помощью ГАС

и установили, что лучшее качество поверхности отверстия повышает свойства образцов с отверстием при растяжении. Прочность образцов слоистых композитов, просверленных с помощью ГАС, была немного больше, чем изготовленных с помощью традиционной механической обработки. Некоторые авторы [9—12] экспериментально исследовали влияние ориентации волокон на прочность углепластиков, подвергнутых квазистатическим и усталостным испытаниям на растяжение. Установили, что усталостная и статическая прочности при внеосевом растяжении меньше, чем при осевом растяжении, и уменьшались с увеличением угла внеосоосности, что сопровождалось нелинейным поведением. В [13] исследовали моды разрушения образцов с отверстием при растяжении. В [14, 15] экспериментально изучали влияние концентрации напряжений на прочность при растяжении образцов с отверстием из тканых композитов с саржевым переплетением 2×2 . Установили, что концентрация напряжений обусловила максимальное растягивающее напряжение на кромке отверстия, которое уменьшалось к свободному краю на нагруженной стороне. Все образцы продемонстрировали хрупкое разрушение в сечении отверстия с ограниченным разрушением в моде расслоения. Наибольший вклад в прочность композита при растяжении внесли слои, ориентированные под углом 0° (т.е. в направлении растяжения). Это подтверждает повышение прочности пластин с открытым отверстием [16, 17]. В [18] показано, что при длительной эксплуатации и усталостном нагружении прочность при растяжении слоистых углепластиков в основном зависит от концентрации напряжений вокруг отверстия. В [19] провели эмпирическое исследование высокоскоростного фрезерования эпоксидных слоистых углепластиков с разными параметрами и установили, что угол ориентации волокон и параметры резки существенно влияют на усилие резки, механизм разрушения материала и предельное напряжение в углепластиках. Разрушающее напряжение и усилие резки изучали на образцах с армирующими волокнами, ориентированными под углом 0 , 45 , 135 и 90° по отношению к направлению растяжения. Максимальный уровень разрушения наблюдали при ориентации волокон под углом 90° , а минимальный — при 135° . В [20—22] продемонстрировали, что такие параметры ГАС, как скорость подачи, размер частиц абразива и давление водяной струи, оказывают большое влияние на обрабатываемую поверхность углепластиков. Для изучения прочности при растяжении тканых эпоксидных углепластиков с разной укладкой слоев в [10] выполнили большое количество экспериментов. Диаграммы деформирования в направлении 0 и 90° были линейными вплоть до разрушения. При внеосевом нагружении наблюдали нелинейное поведение, которое согласуется с прочностью при растяжении однонаправленных композитов при внеосевом нагружении [11]. В [7] экспериментально исследовали влияние качества резки на поведение при растяжении слоистых углепластиков с

отверстием, вырезанных с помощью ГАС. Установили, что на прочность слоистого композита существенно влияет качество поверхности отверстий и моды разрушения при растяжении, в частности, сильное расслоение с расщеплением и разрывом волокон. В [23, 24] результаты статических испытаний на растяжение образцов из углепластика, вырезанных с помощью ГАС, показали, что на прочность влияет качество механической обработки. В [25] провели экспериментальное исследование влияния традиционного сверления и механической обработки с помощью ГАС на характеристики статического растяжения тканых эпоксидных слоистых углепластиков с отверстием. Установили, что способ механической обработки не влияет на их статическую прочность при растяжении. Прочность при растяжении образцов с отверстием оказалась больше, чем образцов без отверстий [16, 26], что можно объяснить распределением остаточных напряжений резки на поверхности отверстия. В [27] исследовали влияние криогенной обработки углепластиков на их свойства при растяжении и установили, что использование криогенной жидкости в качестве смазки в ходе резки образцов повысило прочность углепластиков при растяжении.

Исследований, посвященных тканым углепластикам, немного. Поэтому в настоящей работе основное внимание уделили экспериментальному изучению влияния способов обработки ГАС и ВСФ на прочность при растяжении тканых углепластиков с саржевым переплетением 2×2 , определенную в квазистатических испытаниях. Образцы изготовили в соответствии со стандартами ASTM D3039 и ASTM D5766 [28, 29]. Оба способа резки проанализированы путем сравнения значений модуля Юнга и предельных напряжений и деформаций разных образцов.

1. Эксперимент

1.1. Материал и режущий инструмент. Углепластик изготовлен на основе ткани из углеродных волокон с саржевым переплетением 2×2 и эпоксидной смолы; их основные характеристики представлены в табл. 1. 8-слойные композиты с укладкой $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ с объемным содержанием углеродных волокон 65% изготовили методом ручной укладки с помощью вакуумного насоса. Отверждение провели при комнатной температуре и давлении 1 бар. Размер готовых композитных пластин $500 \times 500 \times 4,5$ мм. Для резки образцов для испытаний на растяжение использовали твердосплавную торцевую фрезу без покрытия с одной режущей кромкой с углом спирали 25° и диаметром 4 мм (рис. 1).

1.2. Вырезка образцов для испытаний на растяжение. В соответствии со стандартами ASTM D3039 (без отверстия) и ASTM D5766 (с отверстием 8 мм) из композитных пластин вырезали образцы длиной 250 мм и шириной 25 мм. Четыре типа образцов с углом несоосности $\theta = 0, 30, 45$ и 90° подвергли механической обработке ГАС и ВСФ (рис. 2).

Табл. 1

Свойства составляющих, использованных для изготовления слоистых эпоксидных углепластиков

Углеткань		Смола	
Тип плетения	Саржа 2x2	Смола	Эпоксидная ЕС 152
Масса на единицу площади	600 г/м ²	Отвердитель	W152 HR
Массовое содержание волокон	Основа 50%; Уток 50%	Доля отвердителя на 100 г смолы	30 г
Прядь	12К HR углеволокон	Изгибная прочность	120—130 МПа
Толщина ткани	0,62 мм	Максимальная деформация	4,5—6,5 %
Прочность углеволокна при растяжении	4200 МПа	Изгибный модуль упругости	3,6—4 ГПа
Модуль упругости углеволокна при растяжении	240 ГПа	Прочность при растяжении	67—75 МПа
Плотность углеволокна	1.78 г/см ³	Прочность при сжатии	88—98 МПа

Наилучшие параметры ВСФ (скорость перемещения $V = 2000$ мм/мин, массовый расход абразива $Q = 400$ г/мин и расстояние отрыва $S = 2$ мм) определили путем предварительных испытаний [30]. С помощью ГАС образцы изготовили на трехосном режущем станке MECANUMERIC PRO 4020 с ЧПУ, работающем с гидравлическим насосом высокого давления

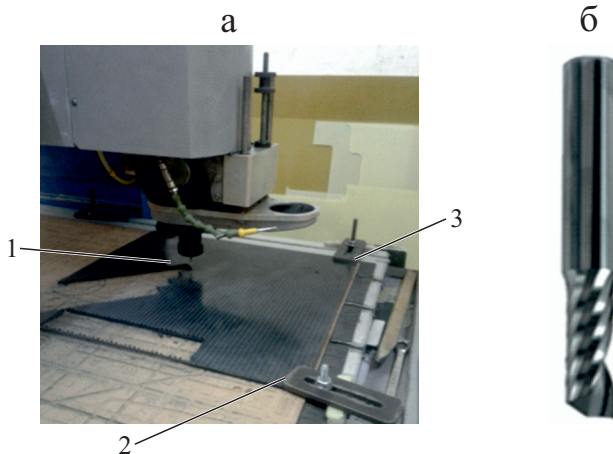


Рис. 1. Вырезка образцов с помощью ВСФ (а) и режущий инструмент — твердосплавная торцевая фреза (б): 1 — шпиндель; 2 — захват; 3 — пластина из углепластика.

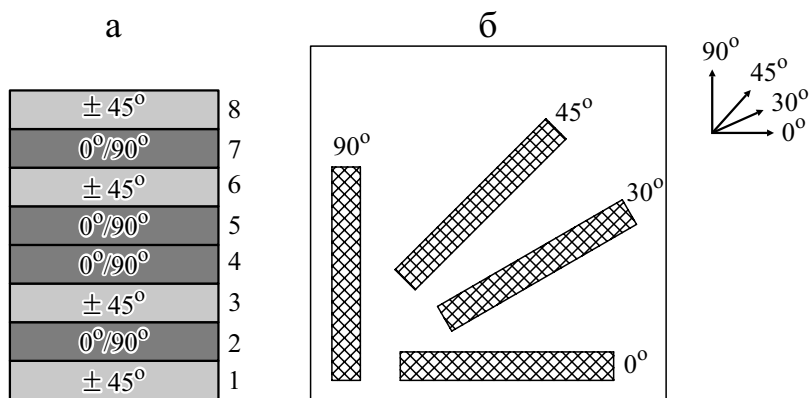


Рис. 2. Конфигурация образцов: последовательность укладки (а) и углы вырезки θ образца (б).

для обеспечения максимального давления водяной струи 350 МПа, потока абразива до 1 кг/мин и максимальной скорости подачи 30 000 мм/мин. Оптимальные параметры резки с помощью ГАС, необходимые для обеспечения хорошего качества шероховатости обработанной поверхности и определенные путем предварительных испытаний, следующие: частота вращения шпинделя $N = 10\,000$ об/мин, скорость подачи $F = 600$ мм/мин, диаметр инструмента $d = 4$ мм. Образцы, изготовленные с помощью ГАС и ВСФ, имели одинаковую конфигурацию.

1.3. Испытание на растяжение. Эксперименты провели при комнатной температуре на современной гидравлической машине Walter & Bay, оснащенной датчиком нагрузки до 100 кН со скоростью перемещения 1 мм/мин. Для обработки результатов экспериментов использовали профессиональную вычислительную программу Dion-7 версии 2.5. Для каждого типа образцов провели не менее трех испытаний. По полученным результатам определили модуль Юнга E , предельную деформацию ε^u и разрушающее напряжение σ^u . Деформацию измеряли двумя тензодатчиками с измерительной базой 25 мм, размещенными в поперечном и продольном направлениях на средней длине от места окончательного разрушения.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

2.1. Гидроабразивная обработка. 2.1.1. Соотношение между напряжением и деформацией при гидроабразивной обработке. Диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$, рассчитанные по экспериментальным зависимостям сила—перемещение для образцов, изготовленных с помощью ГАС, представлены на рис. 3 для всех углов вырезки θ . Кривые практически линей-

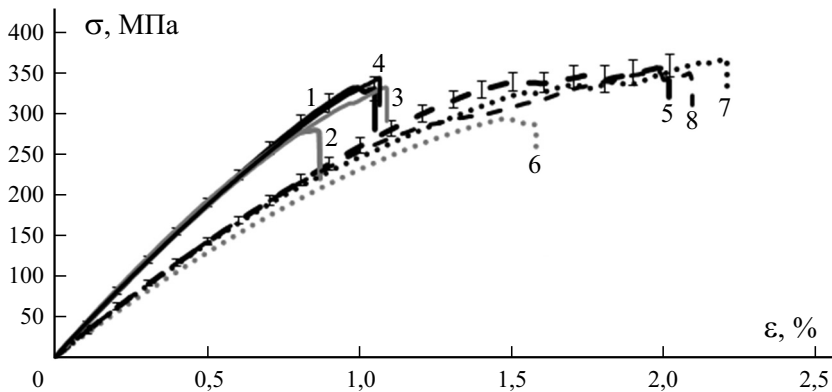


Рис. 3. Диаграммы деформирования σ — ε при растяжении образцов с отверстием (1—4) и без него (5—8), вырезанные с помощью ГАС под углом $\theta = 0$ (1, 5); 30 (2, 6); 45 (3, 7); 90° (4, 8).

ны и совпадают для всех образцов с отверстием вплоть до разрушения. Эти результаты свидетельствуют о квазиизотропном поведении слоистых композитов, обусловленном симметричной укладкой слоев в направлении $\pm 45^\circ$ и $0/90^\circ$, что подтверждают результаты предыдущих исследований таких тканых композитов [14]. Вырезка в направлении 0 , 45 и 90° не повлияла на прочность при растяжении в силу равномерности распределения волокон в направлениях утка и основы слоев. Минимальное разрушающее напряжение 294 МПа при предельной деформации $0,85\%$ наблюдали при вырезке образцов под углом 30° . У образцов с другими углами вырезки разрушающая деформация $\sim 1,1\%$ при прочности ~ 350 МПа. Эти данные согласуются с аналогичными результатами предыдущих исследований [10]. Механическая обработка с помощью ГАС обеспечила большую прочность слоистых композитов благодаря гладкой поверхности с минимальным количеством дефектов расслоения и уменьшенной шероховатостью краев образцов, что также наблюдали в [31]. Максимальное разрушающее напряжение образцов без отверстия при растяжении в направлении $\theta = 0$, 45 и 90° равно ~ 350 МПа, что аналогично таковому образцов с открытым отверстием. Диаграммы деформирования были линейными вплоть до деформации $1,2\%$ при напряжении 250 МПа. Аналогичные результаты для образцов с отверстием и без него получены в [32].

2.1.2. Мода разрушения при резке ГАС. Поверхность разрушения образцов, вырезанных с помощью ГАС по стандарту ASTM D3039, ориентирована в направлении внеосевого нагружения (в частности, при $\theta = 30^\circ$) в ограниченной области (рис. 4).

При растяжении между слоями и матрицей возникало и распространялось расслоение. Разрушение, наблюдаемое на нижней и верхней поверхностях образцов без отверстий, не было хрупким, поскольку поперечные

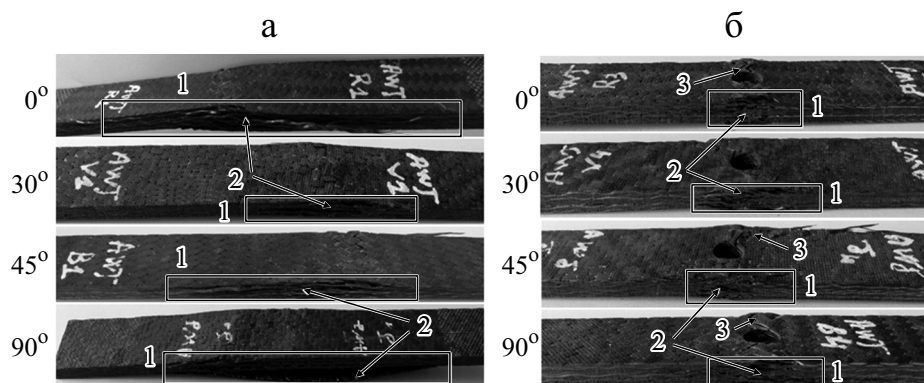


Рис. 4. Моды разрушения при растяжении образцов без отверстия (а) и с отверстием (б), вырезанных с помощью ГАС: 1 — зона повреждения; 2 — расслоение; 3 — разрушение.

трещины в плоскости, создаваемые напряжением межслойного сдвига, распространялись вдоль волокон как в продольном, так и в поперечном направлениях. Их распространение ограничивали пересечения волокон утка и основы, возникавшие перед окончательным разрывом волокон на поверхностях образцов с разной ориентацией слоев, что также наблюдали в [33, 34]. Расслоение внутри слоистого композита распространялось по длине образца. Этот тип разрушения зависит от ориентации слоев и наличия отверстий, обуславливающих уменьшение прочности слоистого композита.

Разрушение и расслоение в образцах с отверстием (стандарт ASTM-D5766) наблюдали в ограниченной области вокруг отверстия, где

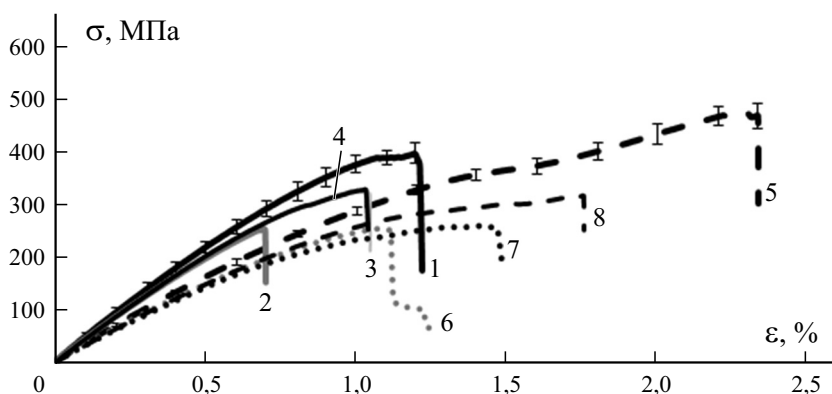


Рис. 5. Диаграммы деформирования σ — ε при растяжении образцов с отверстием (1—4) и без него (5—8), вырезанных с помощью ВСФ под углом $\theta = 0$ (1, 5); 30 (2, 6); 45 (3, 7), 90° (4, 8).

в ходе нагружения имели место наибольшие напряжения. В этом случае прочность слоистого композита обеспечивали все слои, независимо от их ориентации. Разрушение произошло вокруг отверстий и перпендикулярно направлению нагружения 0 и 90° (см. рис. 4). Эти результаты также согласуются с описанными в [35—38].

2.2. Высокоскоростное фрезерование (ВСФ). 2.2.1. *Диаграммы деформирования образцов, вырезанных с помощью ВСФ*, приведены на рис 5. Максимальное предельное напряжение $\sigma = 465$ МПа продемонстрировали образцы без отверстия, вырезанные в направлении $\theta = 0^\circ$, а максимальное напряжение образцов с отверстием — ~ 400 МПа. Диаграммы деформирования образцов без отверстия нелинейны, начиная с деформации 1,2%, что также наблюдали в [10]. Наименьшее предельное напряжение ~ 250 МПа имели образцы, вырезанные под углом 30°. Меньшую предельную деформацию образцов с отверстием можно объяснить высокой концентрацией остаточных напряжений на поверхности отверстия [16, 23].

Максимальная деформация образцов без отверстия, вырезанных под углом 0°, равна 2,3%. Этой деформации сопротивлялись слои композита, ориентированные под углом $\pm 45^\circ$. Разрушение произошло в смоле и слоях, ориентированных под углом 0 и 90°, что обусловлено уменьшением жесткости композита, начиная с деформации 1,2%.

2.2.2. *Моды разрушения образцов, вырезанных с помощью ВСФ*, показаны на рис. 6. Перед окончательным разрушением образцы подверглись расслоению. Поверхности разрушения свидетельствуют о хрупкости материала с ограниченными зонами пластического повреждения. Зоны повреждения образцов без отверстия распространялись на большие расстояния. Наиболее отчетливо это наблюдали для образцов, ориентированных под углом 0 и 90°, продемонстрировавших внезапный и преждевременный разрыв слоев. Зоны разрушения образцов, вырезанных под углом $\theta = 30$

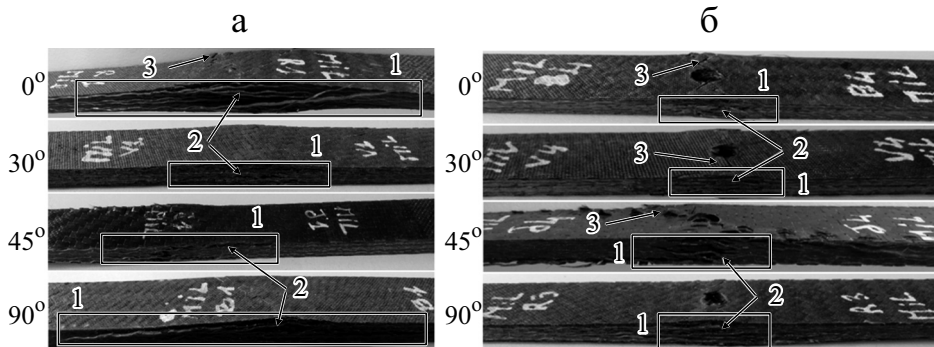


Рис. 6. Моды разрушения при растяжении образцов без отверстия (а) и с отверстием (б), вырезанных с помощью ВСФ: 1 — зона повреждения; 2 — расслоение; 3 — разрушение.

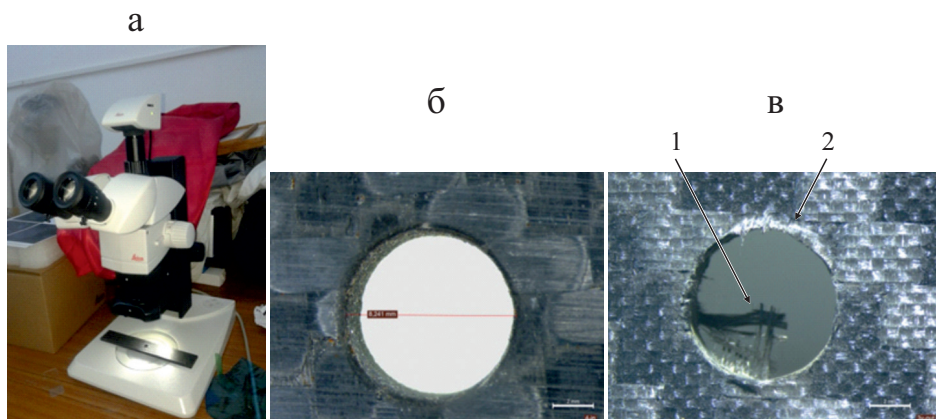


Рис. 7. Измерение округлости и степени расслоения на краях отверстия образцов: микроскоп Leica (а); образец вырезан с помощью ГАС (б) и ВСФ (в): 1 — непрерывные волокна; 2 — расслоение.

и 45° , расположены в середине образцов, что можно объяснить высокой плотностью волокон в направлении растяжения, а также большей жесткостью при растяжении и меньшей деформацией.

Моды разрушения образцов с отверстиями (см. рис. 6) продемонстрировали разрушение слоистых композитов вокруг отверстия. Наблюдали разрушение матрицы и разрыв волокна с расслоением между слоями, а также разрушение слоев в поперечном направлении. Процесс разрушения образцов продолжался до разрыва всех волокон и матрицы. Моды разрушения в каждом направлении видны на наружной поверхности композитов. Разрушение произошло в поперечном и продольном слоях. В образцах, вырезанных под углом 45° , наблюдали разрывы и расщепление волокон вдоль направления внеосевого нагружения, отмеченные в [39, 40]. Разрушение слоев, ориентированных под углом $\theta = 0$ и 90° , распространялось перпендикулярно направлению нагружения, что согласуется с результатами [41]. С точки зрения долговечности конструкций мода разрушения — важный показатель оценки качества изготовления слоистых композитов.

2.3. Сравнение способов обработки ВСФ и ГАС. Для выбора лучшего способа механической обработки с разными параметрами и технологией очень важно проанализировать качество обработки и оценить степень расслоения, являющегося дефектом при механической обработке композитных материалов. Степень расслоения измеряли с помощью цифрового микроскопа Leica M80 и установили, что кромки образцов, обработанных ВСФ, выше, чем при использовании ГАС (рис. 7). Качество образцов, вырезанных с помощью ГАС, также лучше, чем изготовленных с помощью ВСФ, имевших непрерывные волокна на поверхности отверстия и расслоения на внешней стороне слоистых композитов. Технология ГАС

обеспечила высокое качество и гладкие кромки с хорошей округлостью отверстий и меньшим количеством дефектов расслоения.

Для выбора лучшего способа резки слоистых углепластиков также сравнили влияние качества обработки ГАС и ВСФ на механические свойства композитов, определенные при испытаниях на статическое растяжение. Результаты обобщены в табл. 2 и на рис. 8.

Полученные значения прочности при растяжении σ^u образцов с отверстиями и без них свидетельствуют о том, что резка способом ГАС

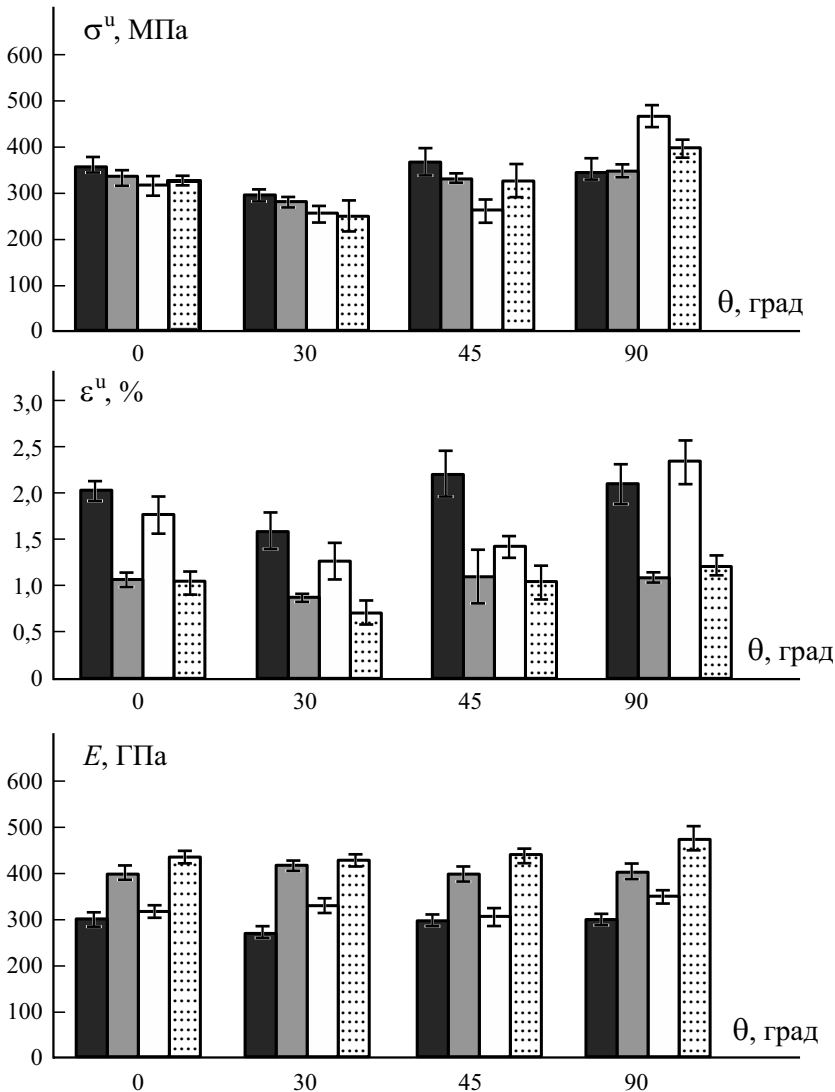


Рис. 8. Диаграммы разрушающего напряжения σ^u , предельной деформации ϵ^u и модуля Юнга E образцов углепластика с отверстием (■, ▨) и без него (■, □), вырезанных с помощью ГАС (■, ▨) и ВСФ (□, ▨) под углом θ .

Табл. 2

Механические свойства образцов без отверстия и с отверстием

θ°	Вырезка с помощью ГАС			Вырезка с помощью ВСФ		
	σ^u , МПа	ε^u , %	E , ГПа	σ^u , МПа	ε^u , %	E , ГПа
Без отверстия						
0	358,59 ±14,82	2,02 ±0,10	30,08 ±1,48	314,42 ±21,80	1,76 ±0,20	31,86 ±1,27
30	294,07 ±11,98	1,58 ±0,20	27,21 ±1,20	253,70 ±17,01	1,26 ±0,21	32,75 ±1,57
45	366,54 ±28,86	2,21 ±0,25	29,65 ±1,17	260,16 ±24,06	1,42 ±0,11	30,64 ±1,83
90	350,73 ±21,04	2,09 ±0,21	30,05 ±1,30	466,02 ±23,34	2,34 ±0,23	34,81 ±1,46
С отверстием						
0	331,10 ±15,11	1,05 ±0,07	39,99 ±1,34	325,19 ±9,46	1,03 ±0,12	43,50 ±1,17
30	279,10 ±12,25	0,86 ±0,03	41,70 ±1,12	249,45 ±33,81	0,70 ±0,13	42,75 ±1,16
45	330,85 ±10,32	1,08 ±0,29	39,85 ±1,50	325,96 ±34,45	1,03 ±0,18	43,89 ±1,31
90	346,76 ±12,86	1,09 ±0,04	40,29 ±1,78	394,55 ±19,56	1,20 ±0,10	47,56 ±2,47

обеспечила лучшие результаты, чем ВСФ, почти для всех образцов, за исключением вырезанных под углом 90° .

Наименьшей прочностью при растяжении обладали образцы, ориентированные под углом 30° . Наименьшую и наибольшую предельную деформацию ε^u продемонстрировали образцы с отверстиями, вырезанные ВСФ под углом 30° , и без отверстий, вырезанные ВСФ под углом 90° . Образцы, вырезанные ГАС, обладали меньшей предельной деформацией ε^u . Меньшая предельная деформация обеспечила увеличение прочности при растяжении благодаря приложенным нагрузкам, сосредоточенным на ограниченном участке вокруг отверстия, обусловившим внезапное разрушение. Образцы, вырезанные с помощью ВСФ под углом 90° , имели наибольший модуль Юнга.

Заключение

Цель выполненной экспериментальной работы — оценка влияния механической обработки гидроабразивной струей и высокоскоростным фрезерованием на механическую прочность слоистых эпоксидных углепластиков. Основные выводы работы следующие.

- В силу равномерности распределения волокон в направлениях утка и основы укладка слоев в тканом углепластике не имела существенного влияния на прочность при растяжении. Прочность при растяжении образцов слоистых углепластиков без отверстия зависела от угла их вырезки.

- Диаграммы деформирования при растяжении образцов с открытым отверстием практически линейны. Значения предельной деформации изменялись от 0,6 до 1,2%. Значение разрушающего напряжения (~ 350 МПа)

образцов без отверстия аналогично таковым образцов с отверстием, вырезанных под углом 0, 45 и 90°. Кроме того, разрушение образцов без отверстия было нехрупким, а диаграммы деформирования нелинейны, начиная с $\sigma = 250$ МПа при $\varepsilon = 1,2\%$.

- Вырезка с помощью ГАС обеспечила высококачественную обработанную поверхность с меньшим количеством дефектов, чем с помощью ВСФ. Значения модуля Юнга, предельной деформации и разрушающего напряжения образцов, вырезанных с помощью ГАС, выше, чем изготовленных с помощью ВСФ.

- Моды разрушения образцов, изготовленных обоими способами, коррелировали с сопротивлением слоистых композитов нагружению растяжением. Разрушение образцов с отверстием происходило в поперечном сечении отверстия перпендикулярно направлению растяжения, а в образцах без отверстия сопровождалось межслойными расслоениями на больших участках. Остаточное напряжение, возникающее на поверхности отверстия, способно уменьшить прочность композита и, как следствие, долговечность композитных соединений.

Благодарность. Авторы благодарны за финансовую поддержку Национальной школе инженеров Туниса (ENIT), Тунисскому университету Эль-Манар в сотрудничестве с лабораторией прикладной механики и современных материалов (LMANM) Университета Гельмы 8 мая (Алжир) и компании ЕКМ Ben-Arous (Тунис) за их вклад в работу. Авторы благодарны за помощь профессору Фабрицио Скарпа из университета Бристоля (Великобритания).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haddad M., Zitoune R., Bougherara H., Eyma F., and Castanie B. Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior // *Composites: Part B*. — 2014. — Vol. 57. — P. 136–43.
2. Boulahem K., Ben Salem S., and Bessrour J. Prediction model of ultimate tensile strength and investigation on microstructural characterization of friction stir welded AA2024-T3 // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2018. — Vol. 95. — P. 1473–1486.
3. Sheikh Ahmad J. *Machining of Polymer Composites*. — Springer, 2009.
4. Pereszlai C. and Geier N. Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2020. — Vol. 106. — P. 3913–3930.
5. Geier N., Davim J. P., and Szalay T. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review // *Composites: Part A*. — 2019. — Vol. 125. — P. 105552.
6. Geier N. and Pereszlai C. Analysis of characteristics of surface roughness of machined CFRP composites // *Periodica Polytechnica Mech. Eng.* — 2020. — Vol. 64. — P. 67–80.

7. *Li M., Huang M., Yang X., Li S., and Wei K.* Experimental study on hole quality and its impact on tensile behavior following pure and abrasive water jet cutting of plain woven CFRP laminates // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2018. — Vol. 99. — P. 2481—2490.

8. *Saleem M., Toubal L., Zitoune R., and Bougherara H.* Investigating the effect of machining processes on the mechanical behavior of composite plates with circular holes // *Composites: Part A.* — 2013. — Vol. 55. — P. 169—177.

9. *Sadeghian P., Rahai A. R., and Ehsani M. R.* Effect of fiber orientation on nonlinear behavior of CFRP Composites // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2009. — Vol. 8. — P. 2261—2272.

10. *Kawai M. and Taniguchi T.* Off-axis fatigue behavior of plain weave carbon/epoxy fabric laminates at room and high temperatures and its mechanical modeling // *Composites: Part A.* — 2006. — Vol. 37. — P. 243—256.

11. *Kawai M., Yajima S., Hachinohe A., and Takano Y.* Off-axis fatigue behavior of unidirectional carbon fiber-reinforced composites at room and high temperatures // *J. Compos. Mater.* — 2001. — Vol. 35. — P. 545—576.

12. *Geier N., Szalay T., and Takács M.* Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2019. — Vol. 100. — P. 3139—3154.

13. *Zhou S., Sun Yi., Chen B., and Tay T. E.* Material orthotropy effects on progressive damage analysis of open-hole composite laminates under tension // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2017. — Vol. 36. — P. 1473—1486.

14. *Ozaslan E., Yetgin A., and Acar B.* Stress concentration and strength prediction of 2×2 twill weave fabric composite with a circular hole // *J. Compos. Mater.* — 2018. — Vol. 53 — P. 463—474.

15. *Suknyov S. V.* Estimation of the tensile strength reduction of a composite laminate with a hole // *Mech. Compos. Mater.* — 2000. — Vol. 36, No. 6. — P. 439—444.

16. *Xiao M., Yongbo Z., Zhihua W., and Huimin F.* Tensile failure analysis and residual strength prediction of CFRP laminates with open hole // *Composites: Part B.* — 2017. — Vol. 126. — P. 49—59.

17. *Wisnom M. R.* Notch Sensitivity of Composites. — Elsevier, 2018.

18. *Lee Y. S., Ben G., and Lee S. H.* Effect of the Hole on the Tensile Fatigue Properties of CFRP Laminates // *Adv. Compos. Mater.* — 2009. — Vol. 18. — P. 43—59.

19. *Zhang L., Wang S., Qiao W., Li Z., Wang N., Zhang J., and Wang T.* High-speed milling of CFRP composites: a progressive damage model of cutting force // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2020. — Vol. 106. — P. 1005—1015.

20. *Ramulu M., Hwang I., and Isvilanonda V.* Quality issues associated with abrasive water jet cutting and drilling of advanced composites // *Am. Water Jet Technology Assoc. Conf. and Expo, Houston, US, 2009.* —P. 18—20.

21. *Azmir M. A. and Ahsan A. K.* Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining // *J. Mater. Process. Technol.* — 2008. — Vol. 198. — P. 122—128.

22. *Haddad M., Zitoune R., Eyma F., and Castanie B.* Influence of machining process and machining induced surface roughness on mechanical properties of continuous fiber composites // *Exp. Mech.* — 2015. — Vol. 55. — P. 519—528.

23. *Hejjaji A., Zitoune R., Crouzeix L., Le Roux S., and Collombet F.* Surface and machining induced damage characterization of abrasive water jet milled carbon/epoxy composite specimens and their impact on tensile behavior // *Wear*.— 2017. — Vol. 376. — P. 1356–1364.

24. *Montesano J., Bougherara H., and Fawaz Z.* Influence of drilling and abrasive water jet induced damage on the performance of carbon fabric/epoxy plates with holes // *Compos. Struct.* — 2017. — Vol. 163. — P. 257–266.

25. *Mhalla M. M. and Bouraoui C.* Experimental, analytical, and finite element study of stress concentration factors for composite materials // *J. Compos. Mater.* — 2016. — Vol. 51. — P. 1583—1594.

26. *Russo A. and Zuccarello B.* An accurate method to predict the stress concentration in composite laminates with a circular hole under tensile loading // *Mech. Compos. Mater.* — 2007. — Vol. 43. — P. 359—376.

27. *Morkavuk S., Köklü Uğ., Bağcı M., and Gemi L.* Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study // *Composites: Part B*. — 2018. — Vol. 147. — P. 1—11.

28. ASTM D5766. Standard test method for open hole tensile strength of polymer matrix composite laminates. Annual book of ASTM standards, 15.03, 2002.

29. ASTM D 3039/D 3039M-00. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, USA, 2017.

30. *Abidi A. and Ben Salem S.* Investigation of delamination factor in high speed milling on carbon fiber reinforced plastics // *Proc. Int. Conf. Des. Model. Mech. Systems*, 2020. — P. 363—374.

31. *Abidi A., Ben Salem S., Yaltese M. A.* Experimental and analysis in abrasive water jet cutting of carbon fiber reinforced plastics // *Conférence: 24ème Congrès Français de Mécanique*, Brest, 26 au 30 Août, 2019.

32. *Wu M. and Lai W. Y.* Mechanical and open hole tensile properties of self-reinforced PET composites with recycled PET fiber reinforcement // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2016. — Vol. 133. — P. 43682.

33. *Aoki T., Ogasawara T., and Ishikawa T.* Effects of normal stress on the off-axis mechanical behavior of a plain woven C/C composite // *Adv. Compos. Mater.* — 2003. — Vol. 12. — P. 123—137.

34. *Yashiro S., Murai K., Okabe T., and Takeda N.* Numerical study for identifying damage in open-hole composites with embedded FBG sensors and its application to experiment results // *Adv. Compos. Mater.* — 2007. — Vol. 16. — P. 115—134.

35. *Kobayashi S., Ogihara S., and Takeda N.* Experimental characterization of the effects of stacking sequence on the transverse crack behavior in quasi-isotropic interleaved CFRP laminates // *Adv. Compos. Mater.* — 2000. — Vol. 9, No. 3. — P. 241—251.

36. *O'Higgins R. M., Padhi G. S., McCarthy M. A., and McCarthy C. T.* Experimental and numerical study of the open-hole tensile strength of carbon/epoxy composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2004. — Vol. 40. — P. 269—278.

37. *Zhou S., Sun Y., Chen B., and Tay T. E.* Material orthotropy effects on progressive damage analysis of open-hole composite laminates under tension // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2017. — Vol. 36. — P. 1473—1486.

38. *Bao H. and Liu G.* Progressive failure analysis on scaled open-hole tensile composite laminates // *Compos. Struct.* — 2016. — Vol. 150. — P. 173—180.

39. *Chen X., Li Z., and Wang H.* Progressive failure analysis of an open-hole composite laminate by using the s-version finite-element method // *Mech. Compos. Mater.* — 2014. — Vol. 50. — P. 279—294.

40. *Paimushin V. N., Polyakova N. V., Kholmogorov S. A., and Shishov M. A.* Buckling modes of structural elements of off-axis fiber-reinforced plastics // *Mech. Compos. Mater.* — 2018. — Vol. 54, No. 2. — P. 133—144.

41. *Kozlov M. V. and Sheshenin S. V.* Modeling the progressive failure of laminated composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2016. — Vol. 51, No. 6. — P. 695—706.

Поступила в редакцию 13.07.2020

Окончательный вариант поступил 01.02.2021

Received July 13, 2020 (Feb. 1, 2021)
