

*A. M. Кумар**, *Р. Парамешваран*, *Р. Раджасекар*, *Ч. Моганаприя*,
Р. Маниваннан

School of Building and Mechanical Sciences, Kongu Engineering College, Erode, Tamilnadu, India

ОБЗОР СВЕРЛЕНИЯ ВОЛОКНИСТО-АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ¹

*A. M. Kumar**, *R. Parameshwaran*, *R. Rajasekar*, *C. Moganapriya*, and *R. Manivannan*

A REVIEW ON DRILLING OF FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES

Keywords: drilling, composite materials, numerical models, drill geometry, thrust force, delamination

The drilling is a very important machining process to increase the joining efficiency of assembled parts. In this review, the consolidation of various composite materials with different fibers are discussed. Different drill tools, their materials and geometries, and drilling methods, such as conventional, vibration-assisted, and high-speed ones, are considered, and various numerical models for determining the critical thrust force and delamination are analyzed. It is concluded that unconventional geometries and materials give better results in reducing the thrust force and delamination compared than the traditional materials and geometrical shapes of drill tools.

Ключевые слова: сверление, материалы композитные, модели численные, геометрия сверла, сила осевой подачи, расслоение

Процесс сверления — очень важный процесс механической обработки для повышения эффективности соединения собранных деталей. В обзоре объединены различные композитные материалы с разной ориентацией волокон, включая угле- и стекловолокна, кевлар, композит, армированный натуральным волокном, и ламинат волокно / металл. Перечислены различные материалы

*Автор, с которым следует вести переписку: amohanmech2006@gmail.com
Corresponding author: amohanmech2006@gmail.com

¹Перевод с англ.

сверлильного инструмента, геометрия и методы сверления (обычное, вибрационное вспомогательное, высокоскоростное). Рассмотрены численные модели, используемые для определения критической силы тяги и расслоения. Нетрадиционная геометрия и материалы обеспечивают лучшие результаты по снижению силы тяги и расслоения по сравнению с традиционными материалами и геометрическими формами буровых инструментов.

Введение

В настоящее время в разных областях наблюдают увеличение спроса на волокнисто-армированные полимерные композиты: CFRP (углепластики), GFRP (стеклопластики), KFRP (органопластики) и т.д., используемые в промышленности благодаря их превосходным механическим свойствам. При выполнении конструкционной работы неизбежно возникает необходимость крепления слоистых композитов с другими материалами. В основном для соединения компонентов сборки используют болты и заклепки, поскольку в силу анизотропии и армирования механическая обработка деталей из композитов труднее, чем обработка традиционных материалов. Механическая обработка приводит к возникновению разных дефектов (например, расслоений в силу отрыва или выдергивания) и уменьшению прочности. Общая классификация композитных материалов представлена на рис. 1.

Расслоение — основной дефект, возникающий при сверлении. В проведенных ранее исследованиях установили, что 60% деталей самолетов

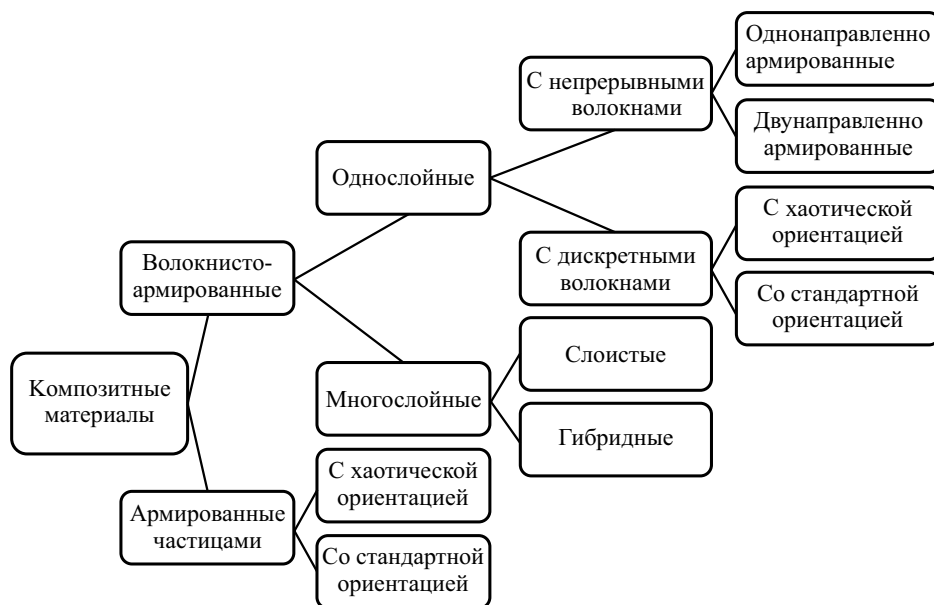


Рис. 1. Основная классификация композитных материалов.



Рис. 2. Параметры сверления композитных материалов.

браковали из-за расслоений в отверстиях. Для сведения брака к минимуму и повышения эффективности соединения следует избегать расслоений и других дефектов, обусловленных сверлением.

В отношении механической обработки композитных материалов опубликовано несколько обзоров [1—6]. Основные параметры сверления композитных материалов приведены на рис. 2.

1. Композитные материалы и ориентация волокон

Разные композитные материалы и ориентация в них волокон указаны в табл. 1. В [7] рассмотрено расслоение на входе и выходе углепластика (однонаправленного и тканого), изготовленного из препрега. В исследовании для сверления использовали ступенчатое сверло из карбида вольфрама и установили, что срок службы инструмента можно увеличить, выполняя сверление тканых композитов с силой осевой подачи, меньшей 125 Н, и крутящим моментом, меньшим 65 Н·мм. В [8] численными и экспериментальными методами исследовали высверливание отверстий

Композитные материалы и ориентация волокон в них

Материал	Слой/лист	Источник
CFRP	Однонаправленный	[7, 10—13, 15, 17, 20—32]
	Двунаправленный и тканый	[7—9, 34—47]
GFRP	Однонаправленный	[21, 48—58]
	Тканый	[59—70]
	Двунаправленный	[35, 65]
	Мат из рубленой стеклопряди	[71, 72]
Композит/металл	CFRP/титан	[73—76]
	GFRP/GLARE	[77—80]
	CFRP/алюминий	[79, 81—86]
	Алюминий/CFRP/титан	[87, 88]
KFRP	Органопластик/керамика	[3, 4, 89]
Натуральное волокно	Сизаль, банан, розелла, койр	[6, 18, 90—93]

в образцах углепластика. Количество слоев под резцом варьировали от одного до шести, увеличивая нагрузку с 360 до 1935 Н. В ходе сверления использовали сверла из разных материалов и установили, что твердосплавный инструмент создает большую силу осевой подачи, чем сверло из быстрорежущей стали. В [9] изучали расслоение при сверлении однонаправленного стеклопластика и предложили спиральное сверло с углом заточки 90° при вершине. В [10] изучали, как скорость резания влияет на износ инструмента и силу осевой подачи, а также проанализировали, как температура боковой поверхности зависит от скоростей подачи и резания при сверлении [11]. В [12] сообщили, что в случае углепластика для нейтрализации эффекта скошенной кромки необходимо предварительное сверление сверлом с двойным кручением (с двумя бороздками). При использовании специального режущего инструмента предварительное сверление углепластика не требовалось. В [13] выполнили сверление углепластика, используя три разных сверла (два с покрытием и одно без покрытия), ни у одного из которых не уменьшился износ или повреждение композита. Сверла спиральной и С-образной формы, применяемые для сверления однонаправленных углепластиков, создавали меньшую силу осевой подачи. Для предсказания силы осевой подачи, непрорезанной толщины при максимальной силе осевой подачи и расслоения при сверлении также использовали конечно-элементную модель [14]. Сравнение экспериментальных и численных моделей выполнили для однонаправленных углепластика и стеклопластика. Отмечено, что силы, возникающие между волокнами и инструментом, обусловили смятие композитов. В [15] для предсказания расслоения на выходе из отверстия, просверленного в композите с длинными волокнами, применили численный метод. В [16]

отметили увеличение износа боковой поверхности при использовании сверла из карбида вольфрама для сверления тканого углепластика при высоких скоростях шпинделя и высокой температуре боковой поверхности, обусловленной сильным истиранием порванных волокон и сверла. На силу резания в большей степени влияли углы заточки и ориентация волокон [17, 18]. В [19] исследовали сверление одно- и многонаправленных углепластиков с помощью концевой фрезы.

В [34] изучали силу осевой подачи и крутящий момент при сверлении углепластиков с использованием твердосплавного сверла-коронки и наблюдали, что оно создает минимальную силу осевой подачи и крутящий момент по сравнению с твердосплавным сверлом. В [37] отметили, что расслоение тканых композитов можно уменьшить на 60—80% на выходе сверла. В [38] показали, что сила осевой подачи, крутящий момент и расслоение возрастают с увеличением скорости подачи и уменьшаются с увеличением скорости шпинделя. В [71] оптимизировали параметры сверления стеклопластика с рублеными волокнами.

1.1. Слоистые композиты с металлическими волокнами. Сверление композитов с металлическими волокнами — процесс утомительный в силу разных свойств их составляющих. В [73] установили, что коэффициент износа инструмента из карбида вольфрама с титановым покрытием больше, чем из поликристаллического алмаза с титановым покрытием. Изменение модуля упругости вызывает изменение диаметра отверстия по всей толщине слоистых материалов с металлическими волокнами. Для уменьшения стоимости высверливания отверстий в волокнисто-армированных материалах использовали сверла с твердосплавным покрытием. В [74] изучали сверление набора из углепластика на основе бисмалеимидной смолы и пластины из титанового сплава с использованием сверл из быстрорежущей стали, быстрорежущей легированной и твердосплавной стали. Сверло из твердосплавной стали продемонстрировало наилучшие результаты с точки зрения повреждения поверхности, термического повреждения и стойкости инструмента. В [87] отметили, что срок службы твердосплавных сверл без покрытия больше, чем твердосплавных сверл с алмазным покрытием при сверлении набора слоев титан/однонаправленный углепластик/алюминий.

В [76] для уменьшения расслоения и образования заусенцев, возникающих при традиционном высверливании отверстий в наборе углепластик/титан, использовали спиральную фрезу. В [77, 94] исследовали округлость отверстия, повреждения на входе и выходе и образование стружки композита GLARE (на основе эпоксидной матрицы, армированной стеклянными и алюминиевыми волокнами) при сверлении. Отмечено, что скорость вращения шпинделя и скорость подачи в наибольшей степени влияли на толщину и высоту заусенцев.

Геометрия и материал сверл

Геометрия и тип	Материал	Источник
Твист-сверло	Быстрорежущая сталь	[14, 49, 51, 61, 64, 90, 91, 95]
	Победит без покрытия	[33, 35, 41, 42, 60, 71, 73, 78, 81]
	Победит с покрытием	[31, 38, 42]
	Поликристаллический алмаз	[9]
	Закаленная сталь	[35]
Ступенчатая	Быстрорежущая сталь/победит	[42, 96]
Четырехгранная пирамида	То же	[39, 65]
Шпоночная фреза	" "	[41, 97—99]
С прямыми канавками	Победит	[35, 41, 65, 100]
Керновое долото	Поликристаллический алмаз	[34, 89]
	Наконечник покрыт алмазной крошкой	[95]
Специальная	Торец из твердого сплава, быстрорежущей стали, поликристаллического алмаза	[9, 20]

2. Геометрия и материал сверл

В табл. 2 указаны материалы и геометрия сверл. Большинство исследований проведено с использованием только твист-сверла (twist drill). Материал сверла также сильно влияет на срок службы и расслоение композита при сверлении. Среди разных типов сверл наибольшее внимание исследователей привлекли сверла из быстрорежущей и твердосплавной стали.

В [51] исследовали силу осевой подачи, создаваемую при сверлении волокнисто-армированного стеклопластика 5-миллиметровым твист-сверлом с углом спирали 30° . Для уменьшения износа инструмента его меняли после каждых пяти экспериментов. Использовали сверла с углами заточки 118° и 135° и сверло из быстрорежущей стали с углом наклона спирали 30° [49]. В [14] изучали расслоение в углепластике при сверлении спиральным, шпоночным и специальным ступенчатым сверлами. Ступенчатое сверло продемонстрировало наилучшие результаты, создав меньшее расслоение. В [9] исследовали силу осевой подачи при сверлении сверлами из быстрорежущей и твердосплавной стали и с поликристаллическим алмазным покрытием. Сверла из быстрорежущей стали создали наибольшую силу осевой подачи.

3. Методы сверления

Для высверливания отверстий в многослойных композитах применяли лишь несколько нетрадиционных методов механической обработки, среди

Методы сверления

Метод	Источник	Примечание
Традиционный	[14, 21, 31, 34, 35, 38, 39, 49, 51, 62, 65, 71, 78, 89—91, 95]	Скорость резания < 100 м/мин (обычно скорость вращения шпинделя < 8000 об/мин). Стандартное твист-сверло, шпоночная фреза
С низкочастотной поддержкой	[25, 61, 86, 102]	Скорость резания < 200 м/мин, наибольшая скорость шпинделя 22000 об/мин
Высокоскоростной	[16, 31, 34, 102]	Скорость резания > 200 м/мин, победитовое твист-сверло

которых можно отметить гидроабразивную, электроэрозионную и некоторые другие [101]. Для высверливания отверстий в многослойных композитах с помощью традиционной механической обработки используют некоторые специальные методы. В настоящем обзоре основное внимание уделено высокоскоростному сверлению, сверлению с низкочастотной поддержкой и с опорной пластиной (см. табл. 2).

3.1. Традиционное сверление. В табл. 3 указаны методы сверления отверстий с использованием разных сверл, разделенные на три группы: традиционный, с низкочастотной поддержкой и высокоскоростной.

3.2. Сверление с низкочастотной поддержкой (СНП) в течение последних нескольких лет в основном использовали исследователи и в промышленности. Операция сверления сочетает низкоамплитудное колебание с низкочастотной подачей. Традиционный процесс сверления — это непрерывный процесс резания, а СНП — прерывистый. Традиционное сверление создает большую силу осевой подачи, а при тех же условиях резания с помощью СНП уменьшает ее на 20—30%.

3.3. Высокоскоростное сверление в последние годы в силу высокой производительности вызывает все больший интерес. Как и при применении СНП, сила осевой подачи, развиваемая при высокоскоростном сверлении, значительно меньше. Однако этот способ очень дорог по сравнению с традиционным сверлением. Цель его использования — уменьшение расслоения за счет сочетания высокой скорости резания, низкой скорости подачи и заданного угла сверла при высверливании отверстия.

3.4. Использование опорной плиты при сверлении слоистых композитов уменьшает расслоение на 60—70%. Этот метод также позволяет увеличить скорость изготовления при высокой скорости подачи.

4. Расслоение, вызванное сверлением

Расслоение, обусловленное сверлением, — это потеря сцепления в слоистых композитах в силу большой силы осевой подачи, возникающей при сверлении.

Табл. 4

Численные модели для расчета критической силы осевой подачи

Источник	Условие сверления	Критическая сила осевой подачи
1	2	3
[81]	CFRP/Al и CFRP; толщина плиты 4,2 мм; скорость шпинделя 2020 и 2750 об/мин; скорость подачи 0,05, 0,1 и 0,15 мм/об; твист-сверло; двойной конус M1, M2 и M3; диаметр сверла 6,35 мм	$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\alpha = 1$
[104]	Льняное волокно; толщина пластины 1,4, 2,14 и 2,68 мм; скорость подачи 0,03, 0,06 и 0,12 мм/об; твист-сверло с углом заточки 118, 110, 100, 90, 80, 70°; диаметр сверла 6 мм; скорость резки 15, 20 и 25 м/мин	<p>Сосредоточенная нагрузка $T_1 = \pi\sqrt{32G_{IC}D'}$, эквивалентная равномерно распределенная нагрузка $T_2 = \frac{\pi\sqrt{32G_{IC}D'}}{1 - 1/2s^2}$, равномерно распределенная нагрузка</p> $T_3 = \frac{\pi\sqrt{32G_{IC}D'}}{\sqrt{J^2\left(1 - \frac{1}{2}S^2\right)^2 + (1 - J)^2\left(1 - \frac{1}{2}\tau^2S^2\right)^2}}$
[105]	CFRP; толщина пластины от 0,3 до 0,82 мм (1, 2 и 3 слоя); скорость подачи 0,03 мм/об; скорость шпинделя 2000, 0,06 и 0,12 об/мин; сверло диаметром 6 мм с твердосплавными вставками диаметром 6 мм	<p>Модель Чжанга $F_Z = \sqrt{\frac{\pi G_{IC}}{\xi(C_3 - K)}}$,</p> $K = \frac{\pi}{2} \left[\frac{A_{11}}{\xi} (3C^2 + C_4^2) + 2A_{12} (C_1C_2 + C_4C_5) + \frac{2A_{16}}{\xi} (2\xi C_1C_4 + 3C_1C_5 + C_2C_4) + A_{26} (3\xi C_2C_4 + 2C_2C_5 + \xi C_1C_5) + \frac{16D_{11}}{\xi} (3D_{11} + 2\xi^2 D_{12} + 3\xi^4 D_{22} + 4\xi^2 D_{66}) + \frac{A_{66}}{\xi} \left[\xi (C_1 + C_2)^2 + 3\xi^2 C_4^2 + 3C_5^2 + 2\xi C_4C_5 \right] + \frac{2B_{11}}{\xi} C_1C_3 + 8B_{12}C_3 (\xi C_1 + C_2) + 24B_{16}C_3 \left(C_4 + \frac{C_5}{\xi} \right) + 24B_{22}\xi^2 C_2C_3 + 24B_{26}C_3 (C_5 + \xi C_4) \right],$

Продолжение табл. 4

1	2	3
---	---	---

модель Гурураджа $F_G = \sqrt{\frac{\pi G_{IC}}{\xi \left(\frac{C_3}{3} - K \right)}}$,

модель Чжанга

$$F = \sqrt{\frac{\pi G_{IC}}{\xi \left[\left(\alpha^2 C_3 - (1-\alpha)^2 \frac{C_3}{3} \right) - \left(\alpha^2 K + (1-\alpha)^2 K \right) \right]}}$$

[15] Диаметр сверла 4,8 мм;
скорость резки 1,5 м/мин

Изотропная $F_Z = \pi \left[\frac{8G_{IC} E h^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2}$ и

ортотропная модель $F_Z = 8\pi \left(\frac{G_{Ic} D}{\frac{1}{3} - \frac{D'}{8D}} \right)^{1/2}$,

где $D = \frac{1}{8}(3D_{11} + 2D_{12} + 4D_{66} + 3D_{22})$,

$$D' = \frac{D_{11} + D_{22}}{2} + \frac{D_{12} + D_{66}}{3}$$

[106] Материал СС160 ЕТ 443;
толщина пластины 6 мм;
скорость шпинделя 2800
об/мин; скорость подачи
0,02, 0,06 и 0,12 мм/об;
скорость резки 53 м/мин;
твист-сверло с углом за-
точки 120 и 85°, четырех-
гранное пирамидальное,
специальное ступенчатое
и кинжальное

Изотропный материал и концентрическая

нагрузка $F_{crit} = \pi \left[\frac{8G_{Ic} E_1 h^3}{3(1-\nu_{I2}^2)} \right]^{1/2}$,

ортотропный материал и точечная нагрузка

$$F_{crit} = 8\pi \left[\frac{2G_{IC} D}{1 - (D' / 8D)} \right]^{1/2}$$

ортотропный материал и равномерно распре-

ленная нагрузка $F_{crit} = 8\pi \left[\frac{G_{IC} D}{(1/3) - D' / 8D} \right]^{1/2}$

[107] CFRP; толщина пла-
стины 4,2 мм; скорость
шпинделя 2000 об/мин;
скорость подачи 0,02 мм/об;
твист-сверло диаметром
6 мм

Модель Чжанга $F_C = \sqrt{\frac{\pi G_{IC}}{\xi (C_3 - K)}}$,

модель Хоченга $F_C = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC} E h^3}{3(1-\nu^2)}}$,

Продолжение табл. 4

1	2	3
		<p>модель Гурураджа $F_C = \sqrt{\frac{\pi G_{IC}}{\xi \left[\left(\frac{C_3}{3} \right) - K \right]}}$,</p> <p>модель Гурураджа с учетом температурного эффекта $F_C = \sqrt{\frac{\pi (K^* + G_{IC})}{\xi \left[\left(\frac{C_3}{3} \right) - K \right]}}$</p> <p>Твист-сверло</p> $F_A = \pi \sqrt{32 G_{IC} M} = \pi \left[\frac{8 G_{IC} E h^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2},$ <p>кольцевое сверло $F_S = \pi \sqrt{\frac{32 G_{IC} M}{1-2s^2+s^4}}$,</p> <p>“подсвечниковое” сверло</p> $F_C = \pi (1+\alpha) \sqrt{\frac{32 G_{IC} M}{1+\alpha^2(1-2s^2+s^4)}}$ <p>сверло-коронка</p> $F_{CR} = \pi \beta (2-\beta) \sqrt{\frac{32 G_{IC} M}{\left\{ \left[1-(1-\beta)^4 \right] - (1/2)s^2 \left[1-(1-\beta)^6 \right] \right\}}}$ <p>ступенчатое сверло</p> $(F_T)_i = \pi \left[1-(i\xi)^2 \right] \sqrt{\frac{32 G_{IC} M}{\left\{ \left[1-(i\xi)^4 \right] - (1/2)s^2 \left[1-(i\xi)^6 \right] \right\}}}$ <p style="text-align: center;">$i = 1 - n$</p>
<p>[97]</p>	<p>—</p>	<p>Однонаправленный CFRP; толщина пластины 20 мм; скорость шпинделя 1492 об/мин; твист-сверло диаметром 16 мм; скорость резки 75 м/мин</p> $F_{IC} = 8\pi (1+\nu_{r\theta}) \sqrt{\frac{G_{IC} D}{\left(\frac{7+8\nu_{r\theta} + \nu_{r\theta}^2}{3} \right) - \frac{D'}{8D}}}$ $D' = \frac{(D_{11} + D_{22})(9 + 2\nu_{r\theta} + \nu_{r\theta}^2)}{2} + \frac{(D_{12})(25 + 2\nu_{r\theta} + \nu_{r\theta}^2) + 2D_{66}(1 + 2\nu_{r\theta} + \nu_{r\theta}^2)}{3}$
<p>[108]</p>		

Продолжение табл. 4

1	2	3
---	---	---

$$F_{2C} = 32\pi D(1 - \nu_{r\theta}^2)(a^2 - b^2)^2 \sqrt{\frac{-9G_{ICP}(C_1 + C_2 + C_3)}{(3C_1 + C_2 + C_3)}},$$

C_1, C_2, C_3 — переменные, зависящие от a, b, D
и D_{ij}

$$C_1 = 96 \left[\left(-2D_{11} - 2D_{22} + \frac{8}{3}D_{66} - \frac{4}{3}D_{12} \right) \nu_{r\theta} + \right. \\ \left. + \frac{16}{3}D - \frac{1}{3}D_{11} - \frac{1}{3}D_{22} - 4D_{66} + \right. \\ \left. C_2 = 72 \left[\left(-16D + 3D_{11} - 3D_{22} + 4D_{66} - 2D_{12} \right) \nu_{r\theta}^2 + \right. \right. \\ \left. + \frac{32}{3}D - 6D_{11} - 6D_{22} - 8D_{66} - 4D_{12} \right] \nu_{r\theta} + \\ \left. + \frac{80}{3}D - \frac{7}{3}D_{11} - \frac{7}{3}D_{22} - \frac{52}{3}D_{66} + \frac{38}{3}D_{12} \right] b^2 + \\ + a^2 \left[\left(-\frac{16}{3}D + D_{11} + D_{22} + \frac{4}{3}D_{66} + \frac{2}{3}D_{12} \right) \nu_{r\theta}^2 \times \right. \\ \left. \times \left(-\frac{32}{3}D - 2D_{11} - 2D_{22} - \frac{8}{3}D_{66} - \frac{4}{3}D_{12} \right) \right] \nu_{r\theta} + 16D - \\ - \frac{5}{3}D_{11} - \frac{5}{3}D_{22} - \frac{28}{3}D_{66} + 6D_{12} \left. \right] (1 + \nu_{r\theta})^2 (a^2 - b^2) b^4 \ln \left(\frac{b}{a} \right), \\ C_3 = 3 \left[\left(-\frac{208}{3}D + 13D_{11} + 13D_{22} + \frac{52}{3}D_{66} + \frac{26}{3}D_{12} \right) \nu_{r\theta}^4 \right. \\ - 416D \nu_{r\theta}^3 + \left(-\frac{640}{3}D - 66D_{11} - 66D_{22} - \frac{680}{3}D_{66} + \frac{284}{3}D_{12} \right) \nu_{r\theta}^2 \\ + (416D - 112D_{11} - 112D_{22} - 384D_{66} + 160D_{12}) \nu_{r\theta} + \\ + \frac{848}{3}D - 27D_{11} - 27D_{22} - \frac{524}{3}D_{66} + \frac{362}{3}D_{12} \left. \right] b^4 \\ - 2 \left[\left(-\frac{16}{3}D + D_{11} + D_{22} + \frac{4}{3}D_{66} + \frac{2}{3}D_{12} \right) \nu_{r\theta}^2 \times \right. \\ \left. \left(-\frac{128}{3}D + 2D_{11} + 2D_{22} + \frac{8}{3}D_{66} + \frac{4}{3}D_{12} \right) \right] \nu_{r\theta} - \frac{112}{3}D +$$

1	2	3
		$\times +9D_{11} - 9D_{22} + \frac{4}{3}D_{66} + \frac{50}{3}D_{12} \Big] a^2 b^2 (v_{r\theta} - 1)^2 +$ $+ \left[\left(-\frac{16}{3}D + D_{11} + D_{22} + \frac{4}{3}D_{66} + \frac{2}{3}D_{12} \right) v_{r\theta}^2 \times \right.$ $\times \left. \left(-\frac{128}{3}D + 2D_{11} + 2D_{22} + \frac{8}{3}D_{66} + \frac{4}{3}D_{12} \right) \right] v_{r\theta} - \frac{112}{3}D +$ $+9D_{11} - 9D_{22} + \frac{4}{3}D_{66} + \frac{50}{3}D_{12} \Big] a^4 (v_{r\theta} - 1)^2 (a^2 - b^2)^2.$

4.1. Оценку расслоения можно выполнить разными методами, но обычно используют отношение F_d максимального диаметра D_{\max} к номинальному $D_{\text{ном}}$:

$$F_d = D_{\max} / D_{\text{ном}}.$$

Измерение расслоения с помощью коэффициента F_d неясно, поскольку несколько волокон отрываются и выдергиваются на значительной ширине, как видно из данных рис. 3, и поэтому трудно определить площадь расслоения просверленного отверстия.

4.2. Методы уменьшения расслоения при сверлении. Следует избегать расслоения при сверлении слоистых композитов, поэтому развиваемая сила осевой подачи должна быть меньше критической, что зависит от геометрии сверла и толщины прорезаемых слоев.

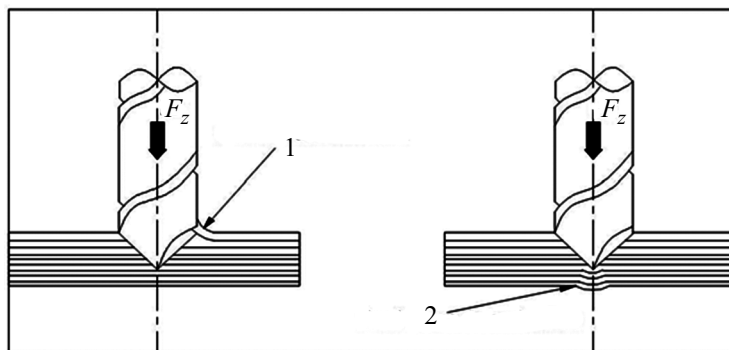


Рис. 3. Расслоение при сверлении отрывом (1) и выталкиванием (2).

5. Сила осевой подачи

Установлено, что сила осевой подачи, возникающая при сверлении слоистых композитов, — основная причина расслоения, напрямую влияющая на площадь области расслоения. Исследователи пришли к выводу, что при силе осевой подачи меньше критической область расслоения будет минимальной [103]. Если сила осевой подачи больше критической, ее величина прямо пропорциональна площади расслоения.

В [59] отмечено, что скорость резания не сильно влияет на расслоение, но скорость подачи прямо пропорциональна силе осевой подачи. Также исследовали влияние скорости резания на силу осевой подачи при сверлении тканых стеклопластиков. При использовании нового сверла скорость резания незначительно влияла на силу осевой подачи, но существенно возрастала при использовании сверла с предварительным износом. В [28] указали, что угол заточки сверла сильно влияет на силу осевой подачи при сверлении слоистых углепластиков и стеклопластиков. Срок службы сверла зависит от силы осевой подачи.

Расслоение, возникающее при использовании твист-сверла с применением низкочастотной поддержки, на 20—30% меньше, чем при традиционном сверлении. Следует отметить, что при высоких скоростях резания (больше 80 м/мин) скорость подачи не сильно влияет на силу осевой подачи, но при нормальной скорости она возрастает с увеличением скорости подачи.

5.1. Численная модель для определения критической силы осевой подачи (табл. 4). В [81] исследовали влияние силы осевой подачи на расслоение на выходе из отверстия при сверлении набора слоев углепластик/алюминий. При анализе использовали две численные модели. В одной рассмотрели выход сверла с учетом одного слоя, а во второй — с учетом слоя алюминия. В [104] отметили, что скорость подачи влияет на силу осевой подачи. В данном исследовании использовано три численных метода: классическая теория изгиба пластин, механика упругого разрушения и механика косоугольного резания. Предложенную модель можно использовать для устранения расслоений путем онлайн-мониторинга силы осевой подачи. В [105] исследовали критическую силу осевой подачи в разных местах возникновения расслоения. В [106] показали, что скорость подачи и геометрия режущей кромки сверла уменьшают количество дефектов расслоения.

Заключение

Данный обзор дает представление о разных методах сверления, материалах сверл, расслоении, возникающем при сверлении волокнисто-армированных композитов и развитии силы осевой подачи. Рассмотрены нетрадиционные сверла, такие как керновое долото, ступенчатые сверла и сверла с прямыми канавками. Среди разных методов сверления высокоскоростное является высокоэффективным и производит отверстия хо-

рошего качества. Разными исследователями предложены и исследованы численные модели силы осевой подачи и коэффициента расслоения. Общий вывод данного обзора заключается в том, что при низких скоростях подачи и высоких скоростях сверления расслоение уменьшается, а срок службы инструмента увеличивается. Для понимания прочности соединения сборки деталей необходимы дальнейшие исследования оценки качества просверленных отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mishra R., Malik J., Singh I., and Davim J. P.* Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates // *Mater. Des.* — 2010. — Vol. 31, No. 6. — P. 2790—2795.
2. *Hrechuk A., Bushlya V., and Ståhl J. E.* Hole-quality evaluation in drilling fiber-reinforced composites // *Compos. Struct.* — 2018. — Vol. 204. — P. 378—387.
3. *Kumar A. M., Parameshwaran R., Krishnaraj V., and Rajasekar R.* Effects of thrust force variation during the drilling of pure and chemically treated Kevlar based polymer composite // *Mater. Testing.* — 2019. — Vol. 61, No. 9. — P. 907—913.
4. *Parameshwaran R., Rajasekar R., Ragavendra V. H., and Praveenraj N.* Effect of thrust force, torque, and induced temperature on Kevlar reinforced composites during drilling process // *Mater. Today: Proc.* — 2020.
5. *Angadi S., Ashrith H., Gaitonde V., Karnik S., and Doddamani M.* Experimental investigations on hole quality in drilling of cenosphere reinforced epoxy composite // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., IOP Publ.*, 2019.
6. *Lotfi A., Li H., Dao D. V., and Prusty G.* Natural fiber-reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability // *J. Thermoplast. Compos. Mater.* — 2019. — 0892705719844546.
7. *Shyha I., Soo S. L., Aspinwall D., and Bradley S.* Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites // *J. Mater. Processing Technol.* — 2010. — Vol. 210, No. 8. — P. 1023—1034.
8. *Rahmé P., Landon Y., Lachaud F., Piquet R., and Lagarrigue P.* Analytical models of composite material drilling // *Int. J. Adv. Manufacturing Technol.* — 2011. — Vol. 52, Nos. 5—8. — P. 609—617.
9. *Madhavan S. and Prabu S. B.* Experimental investigation and analysis of thrust force in drilling of carbon fibre reinforced plastic composites using response surface methodology // *Int. J. Modern Eng. Res.* — 2012. — Vol. 2, No. 4. — P. 2719—2723.
10. *Lin S. and Chen I.* Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed // *Wear.* — 1996. — Vol. 194, Nos. 1—2. — P. 156—162.
11. *Chen W.-C.* Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 1997. — Vol. 37, No. 8. — P. 1097—1108.
12. *Piquet R., Ferret B., Lachaud F., and Swider P.* Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills // *Composites: Part A.* — 2000. — Vol. 31, No. 10. — P. 1107—1115.
13. *Durao L., De Moura M., and Marques A. T.* Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates // *Composites: Part A.* — 2006. — Vol. 37, No. 9. — P. 1325—1333.
14. *Durão L. M. P., Magalhães A., Marques A. T., Baptista A., and Figueiredo M.* Drilling of fibre reinforced plastic laminates // *Mater. Sci. Forum, Trans. Tech. Publ.*, 2008.

15. *Zitoune R. and Collombet F.* Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures // *Composites: Part A.* — 2007. — Vol. 38, No. 3. — P. 858—866.

16. *Rawat S. and Attia H.* Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach // *CIRP Ann.* — 2009. — Vol. 58, No. 1. — P. 105—108.

17. *Jahromi A. S. and Bahr B.* An analytical method for predicting cutting forces in orthogonal machining of unidirectional composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2010. — Vol. 70, No. 16. — P. 2290—2297.

18. *Rezghi Maleki H., Hamedi M., Kubouchi M., and Arao Y.* Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites // *Mater. Manuf. Processes.* — 2019. — Vol. 34, No. 3. — P. 283—292.

19. *Kalla D., Sheikh-Ahmad J., and Twomey J.* Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2010. — Vol. 50, No. 10. — P. 882—891.

20. *Marques A. T., Durão L. M., Magalhães A. G., Silva J. F., and Tavares J. M. R.* Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill // *Compos. Sci. Technol.* — 2009. — Vol. 69, No. 14. — P. 2376—2382.

21. *Kishore R., Tiwari R., Dvivedi A., and Singh I.* Taguchi analysis of the residual tensile strength after drilling in glass fiber reinforced epoxy composites // *Mater. Des.* — 2009. — Vol. 30, No. 6. — P. 2186—2190.

22. *Park K. Y., Choi J. H., and Lee D. G.* Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fiber reinforced plastics // *J. Compos. Mater.* — 1995. — Vol. 29, No. 15. — P. 1988—2002.

23. *Bhatnagar N., Ramakrishnan N., Naik N., and Komanduri R.* On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 1995. — Vol. 35, No. 5. — P. 701—716.

24. *Murphy C., Byrne G., and Gilchrist M.* The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite material // *Proc. Institution Mech. Eng. Part B, J. Eng. Manuf.* — 2002. — Vol. 216, No. 2. — P. 143—152.

25. *Linbo Z., Lijiang W., and Xin W.* Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method // *Composites: Part A.* — 2003. — Vol. 34, No. 3. — P. 237—244.

26. *Wang X., Wang L., and Tao J.* Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics // *J. Mater. Process. Technol.* — 2004. — Vol. 148, No. 2. — P. 239—244.

27. *Zitoune R., Collombet F., Lachaud F., Piquet R., and Pasquet P.* Experiment–calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase // *Compos. Sci. Technol.* — 2005. — 65, Nos. 3—4. — P. 455—466.

28. *Durão L., De Moura M., and Marques A.* Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling // *Eng. Fracture Mech.* — 2008. — Vol. 75, No. 9. — P. 2767—2778.

29. *Durão L. M. P., Gonçalves D. J., Tavares J. M. R., de Albuquerque V. H. C., and Marques A. T.* Comparative analysis of drills for composite laminates // *J. Compos. Mater.* — 2012. — Vol. 46, No. 14. — P. 1649—1659.

30. *Rao G. V. G., Mahajan P., and Bhatnagar N.* Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites—Cutting force analysis // *Compos. Sci. Technol.* — 2007. — Vol. 67, Nos. 3—4. — P. 579—593.

31. *Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M., and Girot F.* Modeling and tool wear in drilling of CFRP // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — Vol. 50, No. 2. — P. 204—213.

32. *Amini S., Baraheni M., and Moeini Afzal M.* Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites // *Compos. Sci. Technol.* — Vol. 5, No. 1. — P. 41—50.
33. *Rawat S. and Attia H.* Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites // *Wear.* — 2009. — Vol. 267, Nos. 5—8. — P. 1022—1030.
34. *Liu D., Xu H. H., Zhang C. Y., and Yan H. J.* Drilling force in high speed drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using half core drill // *Adv. Mater. Res.: Trans. Tech. Publ.*, 2010.
35. *Lazar M.-B. and Xirouchakis P.* Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2011. — Vol. 51, No. 12. — P. 937—946.
36. *Sadek A., Meshreki M., and Attia M.* Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates // *CIRP Ann.* — 2012. — Vol. 61, No. 1. — P. 123—126.
37. *Tsao C., Hocheng H., and Chen Y.* Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force // *CIRP Ann.* — 2012. — Vol. 61, No. 1. — P. 91—94.
38. *Phadnis V. A., Makhdum F., Roy A., and Silberschmidt V. V.* Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation // *Composites: Part A.* — 2013. — Vol. 47. — P. 41—51.
39. *Krishnamoorthy A., Boopathy S. R., and Palanikumar K.* Delamination prediction in drilling of CFRP composites using artificial neural network // *J. Eng. Sci. Technol.* — 2011. — Vol. 6, No. 2. — P. 191—203.
40. *Gaitonde V., Karnik S., Rubio J. C., Correia A. E., Abrao A., and Davim J. P.* Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites // *J. Mater. Process. Technol.* — 2008. — Vol. 203, Nos. 1—3. — P. 431—438.
41. *Faraz A., Biermann D., and Weinert K.* Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2009. — Vol. 49, No. 15. — P. 1185—1196.
42. *Shyha I., Aspinwall D., Soo S. L., and Bradley S.* Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2009. — Vol. 49, Nos. 12—13. — P. 1008—1014.
43. *Davim J. P. and Reis P.* Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study // *Mater. Des.* — 2003. — Vol. 24, No. 5. — P. 315—324.
44. *Davim J. P. and Reis P.* Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments // *Compos. Struct.* — 2003. — Vol. 59, No. 4. — P. 481—487.
45. *Davim J. P. and Reis P.* Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments // *J. Mater. Process. Technol.* — 2005. — Vol. 160, No. 2. — P. 160—167.
46. *Davim J. P., Rubio J. C., and Abrao A.* A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates // *Compos. Sci. Technol.* — 2007. — Vol. 67, No. 9. — P. 1939—1945.
47. *Tsao C. and Hocheng H.* Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2004. — Vol. 44, No. 10. — P. 1085—1090.
48. *Lasri L., Nouari M., and El Mansori M.* Modelling of chip separation in machining unidirectional FRP composites by stiffness degradation concept // *Compos. Sci. Technol.* — 2009. — Vol. 69, No. 5. — P. 684—692.

49. *Kilickap E.* Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite // *Expert Systems with Applications*. — 2010. — Vol. 37, No. 8. — P. 6116—6122.

50. *Baskaran G., Gowri S., and Krishnamurthy R.* Study on vital static properties of fine blanking of GFRP composites with that of conventional drilling // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2010. — Vol. 50, Nos. 5—8. — P. 659—666.

51. *Karimi N. Z., Heidary H., Minak G., and Ahmadi M.* Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates // *Compos. Struct.* — 2013. — Vol. 98. — P. 59—68.

52. *Mathew J., Ramakrishnan N., and Naik N.* Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites // *J. Mater. Process. Technol.* — 1999. — Vol. 91, Nos. 1—3. — P. 1—11.

53. *Ramkumar J. Aravindan S., Malhotra S., and Krishnamurthy R.* An enhancement of the machining performance of GFRP by oscillatory assisted drilling // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2004. — Vol. 23, Nos. 3—4. — P. 240—244.

54. *Ramkumar J., Malhotra S., and Krishnamurthy R.* Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates // *J. Mater. Process. Technol.* — 2004. — Vol. 152, No. 3. — P. 329—332.

55. *Capello E.* Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates // *J. Mater. Process. Technol.* — 2004. — Vol. 148, No. 2. — P. 186—195.

56. *Rao G. V. G., Mahajan P., and Bhatnagar N.* Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism // *Compos. Sci. Technol.* — 2007. — Vol. 67, Nos. 11—12. — P. 2271—2281.

57. *Mkaddem A., Demirci I., and El Mansori M.* A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis // *Compos. Sci. Technol.* — 2008. — Vol. 68, Nos. 15—16. — P. 3123—3127.

58. *Ghasemi F. A., Hyvadi A., Payganeh G., and Arab N. B. M.* Effects of drilling parameters on delamination of glass-epoxy composites // *Australian J. Basic Appl. Sci.* — 2011. — Vol. 5, No. 12. — P. 1433—1440.

59. *Khashaba U., El-Sonbaty I., Selmy A., and Megahed A.* Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I: Effect of machining parameters // *Composites: Part A*. — 2010. — Vol. 41, No. 3. — P. 391—400.

60. *Işık B. and Ekici E.* Experimental investigations of damage analysis in drilling of woven glass fiber-reinforced plastic composites // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2010. — Vol. 49, Nos. 9—12. — P. 861—869.

61. *Mehbudi P., Baghlani V., Akbari J., Bushroa A., and Mardi N.* Applying ultrasonic vibration to decrease drilling-induced delamination in GFRP laminates // *Procedia Cirp*. — 2013. — Vol. 6. — P. 577—582.

62. *Chakladar N. D., Pal S. K., and Mandal P.* Drilling of woven glass fiber-reinforced plastic—an experimental and finite element study // *Int. J. Adv. Manufacturing Technol.* — 2012. — Vol. 58, Nos. 1—4. — P. 267—278.

63. *Kentli A.* Experimental study on peck drilling of GFRP and prediction of drilling-induced damage using ANN // *Sci. Res. Essays*. — 2011. — Vol. 6, No. 7. — P. 1546—1554.

64. *Jayabal S. and Natarajan U.* Influence of cutting parameters on thrust force and torque in drilling of E-glass/polyester composites // *Indian J. Eng. Mater. Sci.* — 2010. — Vol. 17, No. 6. — P. 463—470.

65. *Palanikumar K.* Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites // *Measurement*. — 2011. — Vol. 44, No. 10. — P. 2138—2148.

66. *Velayudham A., Krishnamurthy R., and Soundarapandian T.* Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2005. — Vol. 45, Nos. 4—5. — P. 399—406.

67. *Velayudham A., Krishnamurthy R., and Soundarapandian T.* Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform // *Mater. Sci. Eng., A.* — 2005. — Vol. 412, Nos. 1—2. — P. 141—145.
68. *Arul S., Vijayaraghavan L., Malhotra S., and Krishnamurthy R.* Influence of tool material on dynamics of drilling of GFRP composites // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2006. — Vol. 29, Nos. 7—8. — P. 655—662.
69. *Arul S., Vijayaraghavan L., Malhotra S., and Krishnamurthy R.* The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2006. — Vol. 46, Nos. 3—4. — P. 252—259.
70. *Rubio J. C., Abrao A., Faria P., Correia A. E., and Davim J. P.* Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2008. — Vol. 48, No. 6. — P. 715—720.
71. *Murthy B., Rodrigues L., and Devineni A.* Process parameters optimization in GFRP drilling through integration of Taguchi and response surface methodology // *Res. J. Recent Sci.* — 2012. — Vol. 2277. — P. 2502.
72. *Panneerselvam T., Raghuraman S., and Vidyasundar A.* A study to minimise delamination value during drilling chopped strand mat GFRP material // *Int. J. Mach. Machinability Mater.* — 2014. — Vol. 15, Nos. 3—4. — P.136—146.
73. *Park K.-H., Beal A., Kwon P., and Lantrip J.* Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools // *Wear.* — 2011. — Vol. 271, No. 11—12. — P. 2826—2835.
74. *Ramulu M., Branson T., and Kim D.* A study on the drilling of composite and titanium stacks // *Compos. Struct.* — 2001. — Vol. 54, No. 1. — P. 67—77.
75. *Kim D. and Ramulu M.* Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks // *Compos. Struct.* — 2004. — Vol. 63, No. 1. — P. 101—114.
76. *Denkena B., Boehnke D., and Dege J.* Helical milling of CFRP-titanium layer compounds // *CIRP J. Manufacturing Sci. Technol.* — 2008. — Vol. 1, No. 2. — P. 64—69.
77. *Giasin K. and Ayvar-Soberanis S.* An investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA // *Compos. Struct.* — 2017. — Vol. 159. — P. 745—760.
78. *Park S. Y., Choi W. J., Choi C. H., and Choi H. S.* Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate // *Compos. Struct.* — 2018. — Vol. 185. — P. 684—698.
79. *Pawar O. A., Gaikhe Y. S., Tewari A., Sundaram R., and Joshi S. S.* Analysis of hole quality in drilling GLARE metal fiber laminates // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 123. — P. 350—365.
80. *Tyczynski P., Lemanczyk J., and Ostrowski R.* Drilling of CFRP, GFRP, glare type composites // *Aircraft Eng. Aerospace Technol. An Int. J.* — 2014. — Vol. 86, No. 4. — P. 312—322.
81. *Zitoun R., Krishnaraj V., and Collombet F.* Study of drilling of composite material and aluminium stack // *Compos. Struct.* — 2010. — Vol. 92, No. 5. — P. 1246—1255.
82. *Brinksmeier E. and Janssen R.* Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys // *CIRP Ann.* — 2002. — Vol. 51, No. 1. — P. 87—90.
83. *Kim G. W. and Lee K. Y.* Critical thrust force at propagation of delamination zone due to drilling of FRP/metallic strips // *Compos. Struct.* — 2005. — Vol. 69, No. 2. — P. 137—141.
84. *Sánchez Carrilero M., Álvarez M., Ares E., Astorga J., Cano M., and Marcos Bárcena. M.* Dry drilling of metal fiber laminates CF/AA2024. A preliminary study // *Mater. Sci. Forum, Trans. Tech. Publ.* — 2006.

85. *Giasin K., Ayvar-Soberanis S., and Hodzic A.* An experimental study on drilling of unidirectional GLARE fibre metal laminates // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 133. — P. 794—808.
86. *Kuo C., Li Z., and Wang C.* Multi-objective optimisation in vibration-assisted drilling of CFRP/Al stacks // *Compos. Struct.* — 2017. — Vol. 173. — P. 196—209.
87. *Shyha I., Soo S. L., Aspinwall D. K., Bradley S., Dawson S., and Pretorius C. J.* Drilling of titanium/CFRP/aluminium stacks // *Key Eng. Mater., Trans. Tech. Publ.* — 2010. — Vols. 447—448. — P. 624—633.
88. *Brinksmeier E., Fangmann S., and Rentsch R.* Drilling of composites and resulting surface integrity // *CIRP Ann.* — 2011. — Vol. 60, No. 1. — P. 57—60.
89. *Zheng L., Zhou H., Gao C., and Yuan J.* Hole drilling in ceramics/Kevlar fiber reinforced plastics double-plate composite armor using diamond core drill // *Mater. Des.* — 2012. — Vol. 40. — P. 461—466.
90. *Chandramohan D. and Rajesh S.* Study of machining parameters on natural fiber particle reinforced polymer composite material // *Academic J. Manuf. Eng.* — 2014. — Vol. 12, No. 3. — P. 72—77.
91. *Jayabal S. and Natarajan U.* Drilling analysis of coir-fibre-reinforced polyester composites // *Bull. Mater. Sci.* — 2011. — Vol. 34, No. 7. — P.1563—1567.
92. *Rezghi Maleki H., Hamed M., Kubouchi M., and Arao Y.* Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites // *Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 53, No. 3. — P. 283—295.
93. *Choudhury M. R., Srinivas M. S., and Debnath K.* Experimental investigations on drilling of lignocellulosic fiber reinforced composite laminates // *J. Manuf. Processes.* — 2018. — Vol. 34. — P. 51—61.
94. *Panchagnula K. K. and Palaniyandi K.* Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review // *J. Mater. Res. Technol.* — 2018. — Vol. 7, No. 2. — P. 180—189.
95. *Tsao C. and Chiu Y.* Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2011. — Vol. 51, No. 9. — P. 740—744.
96. *Qiu X., Li P., Li C., Niu Q., Chen A., Ouyang P., and Ko T. J.* Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP // *Compos. Struct.* — 2018. — Vol. 203. — P. 404—413.
97. *Hocheng H. and Tsao C.* Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits // *J. Mater. Process. Technol.* — 2003. — Vol. 140, Nos. 1—3. — P. 335—339.
98. *Hocheng H. and Tsao C.* Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials // *Int. J. Machine Tools Manuf.* — 2006. — Vol. 46, Nos. 12—13. — P. 1403—1416.
99. *Abrão A., Rubio J. C., Faria P., and Davim J.* The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite // *Mater. Des.* — 2008. — Vol. 29, No. 2. — P. 508—513.
100. *Krishnamoorthy A., Boopathy S. R., and Palanikumar K.* Delamination analysis in drilling of CFRP composites using response surface methodology // *Compos. Mater.* — 2009. — Vol. 43, No. 24. — P. 2885—2902.
101. *Shunmugam M. and Kanthababu M.* Advances in unconventional machining and composites // *Proc. AIMTDR 2018, Springer Nature, 2019.*
102. *Meshreki M., Sadek A., and Attia H.* High-speed drilling of thick woven carbon fiber reinforced epoxy laminates // *Can. Aeronautics Space J.* — 2014. — Vol. 60, No. 3. — P. 90—97.

103. *Mudhukrishnan M., Hariharan P., and Palanikumar K.* Measurement and analysis of thrust force and delamination in drilling glass fiber reinforced polypropylene composites using different drills // *Measurement*. — 2020. — Vol. 149. — P. 106973.

104. *Karimi N. Z., Heidary H., and Minak G.* Critical thrust and feed prediction models in drilling of composite laminates // *Compos. Struct.* — 2016. — Vol. 148. — P. 19—26.

105. *Zhang L., Wang L., and Liu X.* A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates // *Proc. Institution Mech. Eng., Part B, J. Eng. Manuf.* — 2001. — Vol. 215, No. 2. — P. 135—146.

106. *Durão L. M. P., Gonçalves D. J., Tavares J. M. R., de Albuquerque V. H. C., Vieira A. A., and Marques A. T.* Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates // *Compos. Struct.* — 2010. — Vol. 92, No. 7. — P. 1545—1550.

107. *Saoudi J., Zitoune R., Gururaja S., Mezlini S., and Hajjaji A. A.* Prediction of critical thrust force for exit-ply delamination during drilling composite laminates: thermo-mechanical analysis // *Int. J. Machining Machinability of Mater.* — 2016. — Vol. 18, Nos. 1—2. — P. 77—98.

108. *Rahme P., Landon Y., Lachaud F., Piquet R., and Lagarrigue P.* Delamination-free drilling of thick composite materials // *Composites: Part A*. — 2015. — Vol. 72. — P. 148—159.

Поступила в редакцию 16.10.2020

Окончательный вариант поступил 09.06.2021

Received Oct. 16, 2020 (June 9, 2021)
