

Влияние технологических параметров процесса сверления КМ на прочность

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Государственное предприятие «Антонов»
Киевский авиационный техникум
Сумской национальной аграрный университет*

Исследовано влияние технологических параметров процесса сверления полимерных композиционных материалов на прочность. Показана зависимость прочности образцов из угле-, стекло-, органопластиков от скорости резания, формы заточки свёрл, температуры в зоне резания и марки инструментального материала. Рекомендованы оптимальные скорости резания и марки инструментального материала.

Ключевые слова: композиционные материалы; свёрла: стандартные, перовые, с подрезающими кромками; температура резания; угле-, стекло-, органопластики; теплопроводность; сталь быстрорежущая; твёрдый сплав; термопластик; терморезистивные ламинаты; слоистые КМ; напряжение; геометрические и технологические параметры; сверление; структура армирования; болтовое соединение; качество поверхности; шероховатость; усадка отверстия; пирометр; физико-механические свойства; связующее; наполнитель; стойкость; форма заточки.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в ракетно-космическом производстве и авиационной промышленности при изготовлении, в том числе, различных силовых элементов, термостойких панелей, люков, воздухозаборников и многих других деталей, от которых требуется сочетание высокой прочности, легкости, термоустойчивости, а также долговечности. Механические свойства ПКМ зависят, прежде всего, от характеристик используемых в основе волокнистых наполнителей, качества их поверхности и микроструктуры. В свою очередь, свойства волокон существенно зависят от особенностей их структуры, типа и количества дефектов. Для высокопрочных ПКМ оказывают влияние на механические свойства как внутренние, так и внешние дефекты.

Более активное использование в силовых конструкциях полимерных композиционных материалов зависит от разработки реальных методов прогнозирования их свойств на всем жизненном цикле их эксплуатации.

Несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных исследованию лезвийной обработки ПКМ (П.Р. Родина, Н. И. Житника, В. И. Дорожжина, Б. П. Штучного, А. В. Руднева, А. А. Степанова, К. А. Иноземцева и др.), показано, что наибольшие трудности вызывает обработка отверстий заданного качества из-за ярко выраженной анизотропии свойств ПКМ. Кроме того, при сверлении наблюдается низкая стойкость режущего инструмента из-за абразивного износа. Так, например, для перфорации системы шумоглушения одного изделия Ан-124 необходимо более 1000 штук свёрл.

По экспертной оценке начальника отдела «Технология материалов» фирмы «Boeing», потенциально до 65 % от общего веса самолета могло бы быть выполнено

из композиционных материалов.

Существует три причины, по которым происходит замена металлов этими материалами: 1) снижение массы; 2) снижение расхода топлива; 3) упрощение чертежей элементов конструкций.

Массу самолета снижают в целях увеличения полезной нагрузки, а расход топлива – для упрощения конструкции, что представляет интерес для конструкторов.

В отличие от металлических материалов полимерные композиционные материалы позволяют значительно снизить массу конструкции изделия. Однако, обладая такими характеристиками, как высокая удельная прочность и жесткость; высокие химические и коррозионная стойкость; возможность создания элементов конструкции с заранее прогнозируемыми свойствами, наиболее полно отвечающими конкретным условиям работы, эти материалы имеют свои недостатки. К ним необходимо отнести прежде всего анизотропию физико-механических свойств; низкую межслоевую прочность на сдвиг в плоскостях, параллельных арматуре; низкие прочность на смятие и ударная вязкость. Все эти показатели негативно влияют на эффективность обработки резанием.

Весовая эффективность материала, оцениваемая его удельными прочностью σ_b/ρ и жесткостью E/ρ , для различных видов деформаций разная (табл. 1) [1].

Таблица 1

Сравнительная характеристика материалов

Материал	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, г/см ³	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E , ГПа	Удельная проч- ность $\sigma_b/\rho \cdot 10^{-7}$, см/с ²	Удельная жесткость $E/\rho \cdot 10^{-10}$, см/с ²	Относи- тельная стоимость
Стали						
легированные	7,8	800–1600	210	5,4–20,6	2,70	0,2–0,4
Сплавы:						
–алюминиевые	2,7	400–650	72	14,8–20,4	2,65	1–3
	2,7	200–500	72	7,5–18,5	2,65	1–2
–магниевые	1,8	200–340	45	11,0–18,7	2,50	2–5
	1,8	200–270	45	11,0–15,0	2,50	2–4
–титановые	4,5	500–1300	120	11,0–29,0	2,68	5–10
	4,5	630–860	120	14,0–19,0	2,68	5–10
Композиционные материалы	1,4–2,6	500–1300	35–250	40–60	2,5–10,0	8–30

Исследование температур при сверлении КМ

Обработку резанием применяют на всех стадиях изготовления деталей из КМ. При этом используют почти все существующие виды обработки резанием: точение, фрезерование, сверление, шлифование, зачистка, нарезание резьбы.

Обрабатываемость резанием армированных композиционных материалов в значительной степени зависит от типа применяемых армирующих волокон. На практике в основном используют стекловолокно, углеволокно и арамидные волокна.

Стекловолокно относится к аморфным неорганическим волокнам. Эти волокна вследствие своей структуры подвержены хрупкому разрушению. В отличие от них для арамидных волокон характерно вязкое разрушение, обусловленное их микроструктурой. Арамидные волокна состоят из большого количества сверхмикроскопических волокон, что является причиной расплетения отдельных волокон в направлении оси волокна.

При обработке резанием КМ достигаемое качество поверхности является функцией ориентации волокон относительно режущей кромки инструмента и, следовательно, угла между направлением резания и направлением волокон (рис. 1).

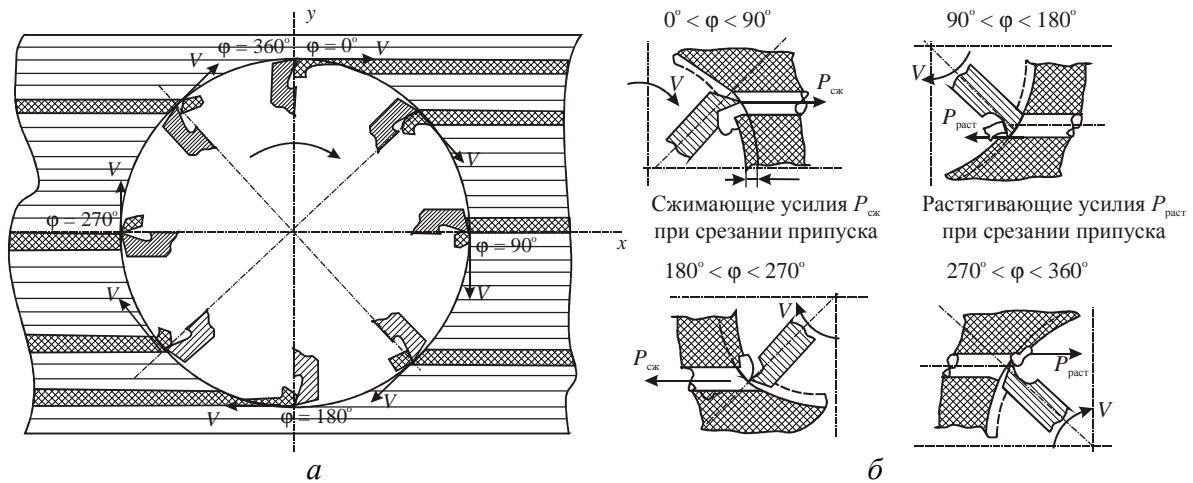


Рис. 1. Схема срезания припуска режущим клином сверла волокон наполнителя:
 а — в монослое слоистых КМ;
 б — схема действия усилий на отдельные волокна в зонах резания φ обрабатываемого отверстия

Коэффициент теплового расширения пластмасс больше (иногда в 10 раз), чем стали. Следовательно, расширение пластмасс под влиянием сил трения приводит к дальнейшему ухудшению условий резания, в результате чего увеличивается количество выделяемого тепла. В табл. 2 приведены физико-механические свойства исследуемых слоистых КМ.

Таблица 2

Физико-механические свойства исследуемых материалов

№ п/п	Исследуемый материал	Коэффициент термического расширения, $d \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$	Температуропроводность, $d \times 10^3 \cdot m^2/s \cdot C$	Удельная теплоемкость, кДж/кг · К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м · К
1	Металл	1,5...32	86...418	0,1...2,3	16...418
2	Стеклопластик	35...30	0,3...1	1,7...4,2	0,14...0,65
3	Углепластик	0,5...5 74	130...190 0,4...1,5	0,6...15 1...3,8	58...100 0,34...0,93
4	Боропластик	4...5	0,24...58	1,1	0,5...0,7
5	Органопластик	0,6...5,3	0,2...0,55	1,4...2,3	0,11...0,37
6	Полимер	4...550	0,1...15	0,5...2,9	0,9...1,1

По данным работ Л. Н. Резникова, М. Ф. Семко, Н. И. Коновалова, В. П. Штучного [2, 3, 4] распределение температуры в зоне резания между инструментом, деталью, структурой и окружающей средой происходит в соответствии с данными, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

**Распределение теплоты в зоне резания
при сверлении слоистых КМ**

№ п/п	Обрабатываемый материал	Инструмент, %	Деталь, %	Стружка, %	Окружающая среда, %
1	Металл	5...10	15...20	70	3...5
2	Углепластик	80...90	5...10	8...8	3...6
3	Стеклопластик	70...85	10...15	5...8	3...5
4	Органопластик	60...70	15...20	10...15	3...5

Как видно из табл. 3, основная доля теплоты резания отводится через инструмент и в значительной мере концентрируется на его режущих кромках.

Однако ограничивающим фактором будет не столько теплостойкость материала режущего инструмента, сколько химическая стойкость полимерного связующего, так как уже при температурах 150...200°C происходит его разложение [5].

Если при резании металлов допустимая температура режущего инструмента (краснотойкость) влияет на режим резания, то при резании термореактивных КМ основное влияние оказывает обрабатываемый материал.

В реальных слоистых ламинатах расположение наполнителя должно быть довольно близким друг к другу, на расстоянии менее их радиуса. Это указывает на то, что равномерное объёмное расположение нитей значительно влияет на физико-механические показатели изделия (рис. 2) [6].

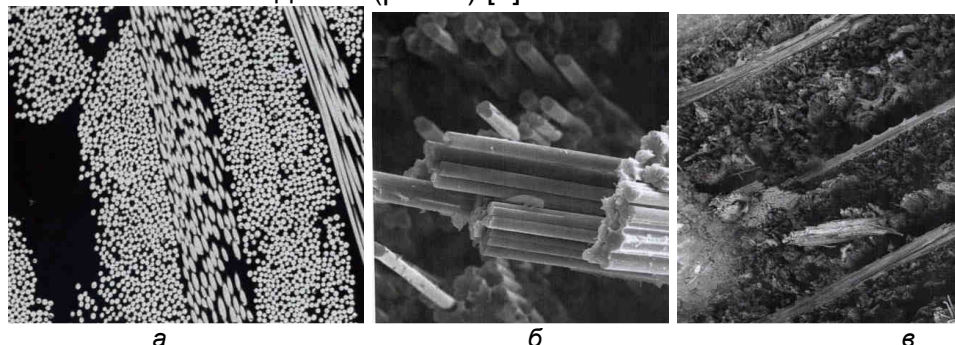


Рис. 2. Структура слоистых материалов (снимки сделаны на электронном микроскопе ZEISS EVD40XVP с системой рентгеновского микроанализа INCA Energy):
а — углепластик; б — стеклопластик; в — органопластик

Для толстостенных конструкций важен учёт практически всех параметров температурного режима. Для тонкостенных слоистых авиационных конструкций температурные поля оказывают менее существенное влияние, потому что у них время контактирования с тепловым источником (например, сверлом) незначительно. Например, для КМ толщиной 2...5 мм на режиме резания $V \approx 50$ м/мин, $S = 0,05...0,1$ мм/мин время контакта составляет порядка 2...3 с.

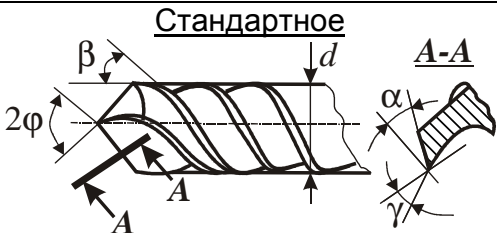
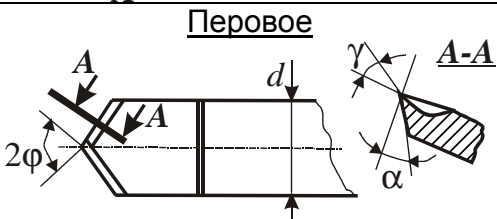
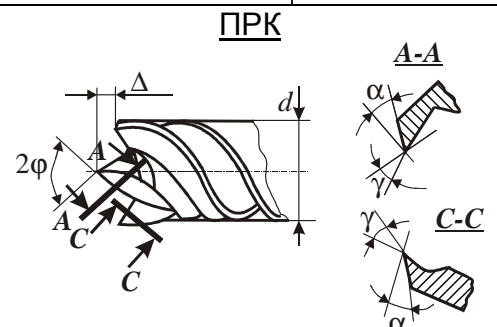
Теплопроводность полимерных композиционных материалов сравнительно

низкая (у терморезистивных $\approx 0,3$ Вт/(м · К), термопластиков $\approx 0,15$ Вт/(м · К), у металлов — $0,1...2,3$ кДж/(кг · К)), поэтому она является причиной аккумуляции тепла в зоне резания. Выделяющееся тепло в значительной мере отводится через материал инструмента [1, 2]. В связи с этим необходимо учитывать также тот факт, что у терморезистивных пластмасс разрушение начинается при температурах $180...200^{\circ}\text{C}$, а у термопластиков — $60...120^{\circ}\text{C}$. При достижении этих температур на поверхности резания заметно увеличивается шероховатость обработки, проявляется склонность к подгоранию, возможна деструкция приповерхностного слоя материала, что влияет на размеры и допуски отверстия [7, 8, 9].

В работе для всех дальнейших исследований были выбраны несколько типов сверл с их конструктивно-геометрическими параметрами (табл. 4).

Таблица 4

Конструктивно-геометрические параметры сверл

Тип сверла	Марка материала режущей части инструмента	Конструктивно-геометрические параметры							Допустимая величина износа h , мм
		d , мм	γ , °	α , °	2ϕ , °	β , °	ω , °	Δ , мм	
<p>Стандартное</p> 	Р6М5 Р18 ВК8	5	18	15	110	—	—	—	0,25
<p>Перовое</p> 	ВК8	5	18	15	110	—	—	—	0,25
<p>ПКР</p> 	Р18 ВК8	5	18	12	120	45	—	0,5	0,25

При обработке указанных в табл. 2 материалов толщиной 6 мм сверлами ПКР из ВК8 $\varnothing 5$ с условием ограничения износа по задней грани до $0,25...0,3$ мм получены данные, приведённые в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты испытаний образцов на прочность
в зависимости от диаметра отверстия и температуры**

Схема армирования	Диаметр отверстия, мм	$\sigma_{\text{базов}}$, КГС/ММ ²		$\sigma_{\text{ослабл}}$, КГС/ММ ²		K_x	
		20°С	80°С	20°С	80°С	20°С	80°С
$[0^\circ; 90^\circ; \mp 45^\circ; 0^\circ; 90_2^\circ]_S$ Распределение армирующего материала: 0° — 33,3% 45° — 33,3% 90° — 33,3%	Образец (без отверстия)	41,9	40,2	41,9	40,2	1	1
	$d = 2$	34,3	34,3	37,1	36,8	1,12	1,14
	$d = 3$	33,1	31,0	36,9	34,4	1,14	1,22
	$d = 4$	28,4	26,1	32,9	30,2	1,27	1,38
	$d = 5$	27,1	25,8	32,7	31,7	1,28	1,35
	$d = 6$	26,2	23,9	31,3	30,8	1,26	1,34

Базовые напряжения ($\sigma_{\text{базов}}$), ослабленные сечения ($\sigma_{\text{ослабл}}$) (отверстиями), рассчитывались по формулам:

$$\sigma_{\text{базов}} = \frac{P}{B \cdot h}$$
 — среднее напряжение в образцах в расчёте на полное сечение образца;

$$\sigma_{\text{ослабл}} = \frac{P}{h \cdot (l - d)}$$
 — среднее напряжение разрушения в образцах в расчёте на ослабленное сечение образца;

$$K_x = \frac{\sigma_{\text{базов}}}{\sigma_{\text{ослабл}}}$$
 — коэффициент концентрации напряжений вблизи отверстия.

Необходимо отметить, что с увеличением скорости сверления усадка отверстий незначительно снижается. Результаты этой серии экспериментов показаны на рис. 3.

На эксплуатационные свойства детали помимо указанных в чертеже марки материала, его структуры, твёрдости, точности и шероховатости обработанных поверхностей значительное влияние оказывают тип инструмента и режим обработки.

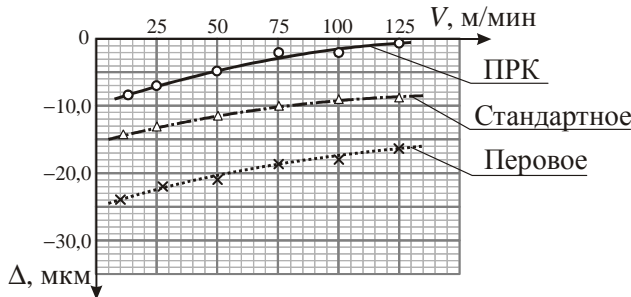


Рис. 3. График зависимости усадки отверстий в углепластике от скорости резания

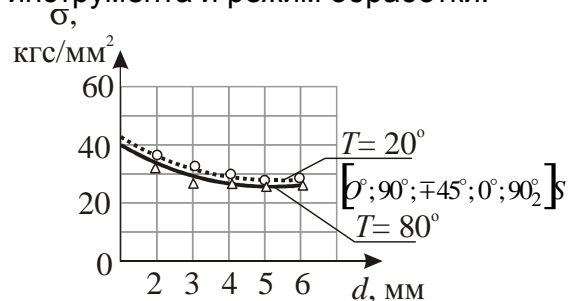


Рис. 4. График изменения прочности образцов из углепластика в зависимости от диаметра отверстий и температуры испытаний

В работе проведены исследования влияния диаметра отверстий на прочность образцов из углепластика на основе углеродной ленты ЭЛУР-0,1П и связующего ЭДТ-69. Образцы имели структуру армирования $[0^\circ; 90^\circ; \mp 45^\circ; 0^\circ; 90^\circ]_S$. Углепластики имели такой состав: объемное содержание волокна $\sim 59\%$, содержание связующего $\sim 40\%$, удельный вес $\sim 1,5 \text{ г/см}^3$. Испытания проводили при температурах 20 и 80°C на машине FRZ-100/1.

Результаты испытаний представлены в табл. 5 и на рис. 4, из которого видно, что с увеличением диаметра отверстий и температуры снижается прочность конструкции.

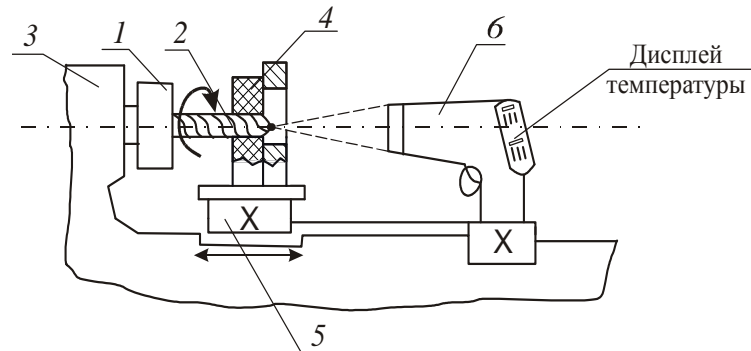


Рис. 5. Схема замера температур пирометром на станке 1К62:
1 — шпиндель; 2 — сверло; 3 — станок; 4 — исследуемый материал;
5 — подвижный резцедержатель; 6 — пирометр

С учетом того, что температурный фактор при резании композиционных материалов является определяющим при их обработке, были выполнены исследования зависимости температуры от марки инструментального материала, формы заточки и скорости резания. Эксперименты проведены в такой последовательности: на первом этапе на образцах углепластика (ЭЛУР-П-0,1), стеклопластика (Т-10-14) и органопластика (Т-42/1-76) на станке 1К62 с помощью бесконтактного пирометра DT-8865 замеряли температуру инструмента в соответствии со схемой замера, изображенной на рис. 5. Результаты исследований показаны на рис. 6, 7.

На следующем этапе исследований из перечисленных выше марок материалов были изготовлены образцы в количестве по три штуки на каждый эксперимент в соответствии с технологической инструкцией ТИ59-1110-09. После сверления образцов на установке INSTROM 5582 проводили их разрушение на статическую прочность в НИЛ ГП «Антонов».

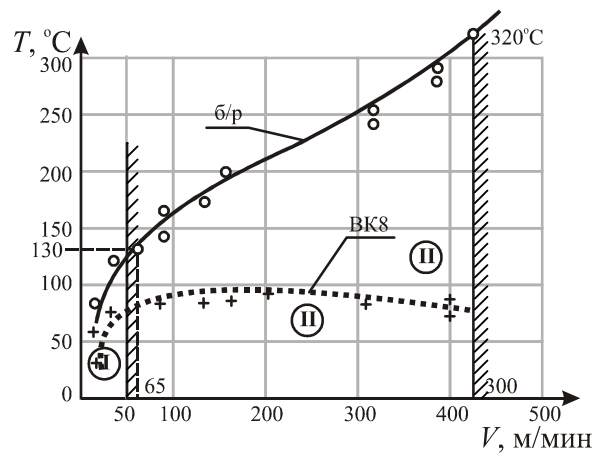


Рис. 6. Зависимость температуры от скорости резания при сверлении углепластиков первыми сверлами из Р-18 и ВК8; I — рекомендуемая область резания при сверлении первыми сверлами из Р-18; II — для сверл из ВК8

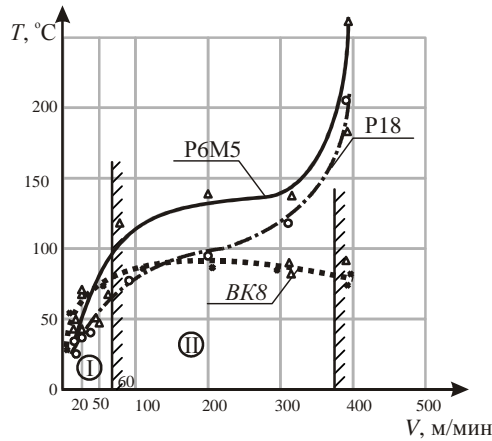
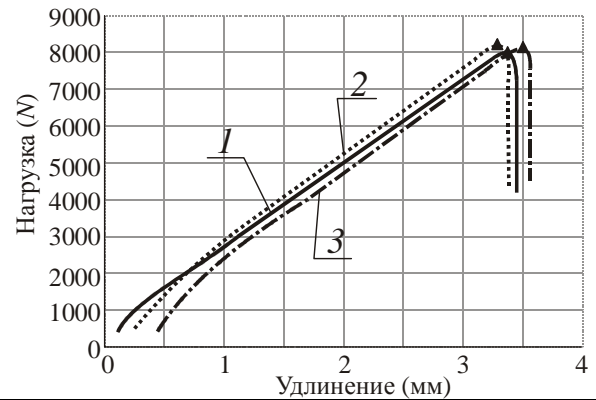
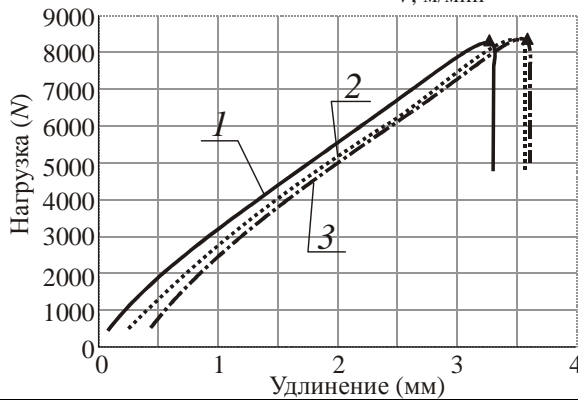


Рис. 7. Зависимость температуры от скорости резания при сверлении углепластиков сверлами из быстрорежущих сталей и BK8; I — область рекомендуемых скоростей резания сверлами с подрезающей режущей кромкой (ПРК) и б/р; II — для сверл из BK8

Графики испытания образцов на установке INSTRON 5582 показаны на рис. 8 и в табл. 6.



Образец	Вид испытаний и база испытаний, характеристика образцов	Толщина, мм	Ширина, мм	Разруш. усилие, N	Предел прочн., МПа	Вид испытаний и база испытаний, характеристика образцов	Толщина, мм	Ширина, мм	Разруш. усилие, N	Предел прочн., МПа
1	Растяжение	1,74	15,22	8348	315	Растяжение	1,71	15,20	8255	318
2	Сверло с ПРК	1,74	15,28	8450	319	Стандартное сверло	1,72	15,20	8395	321
3	T-42	1,74	15,24	8447	319	Стеклопластик	1,70	15,20	8359	323
Среднее		1,74	15,25	8428	318		1,71	15,20	8336	321

а — сверло ПРК; б — сверло стандартное

Рис. 8. Графики испытаний образцов на разрушение с отверстиями Ø5 мм (концентратором напряжений): а — сверло ПРК; б — сверло стандартное

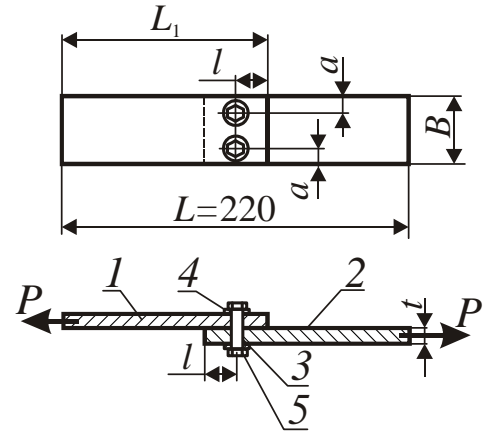
Таблица 6

Прочность образцов-свидетелей с отверстием Ø5 мм при растяжении

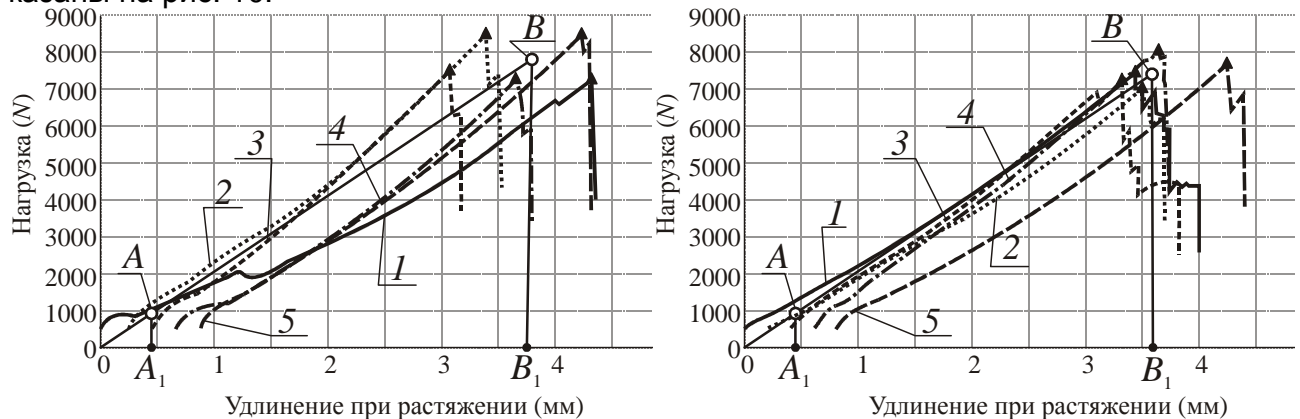
Материал испытываемого образца	Вид инструмента	Ширина образца B, мм	Толщина образца t, мм	Разрушающее усилие $P_{кр} \cdot H$	Базовая прочность ламината $\sigma_b, Н/мм^2$
Углепластик	ПРК	15,3	1,0	4500	300
	Стандартное	15,3	1,0	3700	250
	Перовое	15,3	1,0	4000	260
Стеклопластик	ПРК	15,2	1,7	8400	410
	Стандартное	15,2	1,7	8000	405
	Перовое	15,2	1,7	6000	380
Органопластик	ПРК	15,3	1,8	8300	406
	Стандартное	15,3	1,8	6000	380
	Перовое	15,3	1,8	5500	370

Для последующей серии экспериментов изготавливали образцы из углепластика ЭЛУР-П-0,1 на связующем 5-211-БН, толщиной 2,2 мм, шириной 25 мм со схемой выкладки $[90^\circ; -45^\circ; +45^\circ; 0^\circ; 0^\circ; +45^\circ; -45^\circ; 90^\circ]_S$. Две пластины соединяли болтами М5 ОСТ-131528-80 с прижимными шайбами $\varnothing 10$ мм с двух сторон в соответствии с рис. 9.

Рис. 9. Схема болтового соединения двух пластин из углепластика:
1, 2 — пластины; 3 — болт М5;
4 — шайбы; 5 — гайка



Затяжку болтового соединения проводили с величиной крутящего момента 4...6 кПа. В качестве варьируемых технологических параметров были приняты скорость резания и геометрические данные типов инструмента. Для каждой серии было изготовлено по пять штук образцов. Графики растяжений, статических испытаний образцов показаны на рис. 10.



Образец	Вид испытаний и база испытаний, характеристика образцов	Толщина, мм	Ширина, мм	Разруш. усилие (N)	Предел прочн. (МПа)	Вид испытаний и база испытаний, характеристика образцов	Толщина, мм	Ширина, мм	Разруш. усилие (N)	Предел прочн. (МПа)
1	Сверло с подрезающей кромкой — 2500 об/мин	2,10	25,00	7249	138	Материал УОЛ 300-1А	2,25	24,95	7402	132
2	Материал УОЛ 300-1А	2,03	24,90	8477	168	Стандартное сверло	2,23	25,00	7051	126
3		2,17	25,10	7536	138	2500 об/мин	2,15	24,95	7243	135
4		2,12	25,00	7274	137		2,03	25,10	8063	158
5		2,14	25,00	8488	159		2,06	25,10	7613	147
Среднее		2,11	25,00	7805	148		2,14	25,02	7474	140

Рис. 10. Графики испытаний образцов с болтовым соединением для сверл:
а — сверло ПРК; б — сверло стандартное

Результаты статических испытаний болтовых соединений на прочность представлены в табл. 7.

Таблица 7

**Результаты статических испытаний на растяжение
болтовых соединений углепластика**

Вид инструмента	Ширина образца B , мм	Толщина образца t , мм	Скорость резания V , м/мин	Разрушающее усилие $P_{кр} \cdot H$	Показатель предела прочности σ_b , Н/мм ²
ПРК	25,0	2,0	10,0	8000	270
			25,0	8800	296
			50,0	8700	290
Стандартное	25,0	2,0	10,0	7500	230
			25,0	7800	260
			50,0	7450	245
Перовое	25,0	2,0	10,0	7400	227
			25,0	7500	250
			50,0	7480	249

Выводы

Анализируя представленные материалы о влиянии технологических факторов процесса сверления слоистых материалов на их прочностные характеристики, можно сделать следующие выводы.

- В процессе сверления КМ наибольшее влияние на прочностные характеристики оказывает скорость резания. Поэтому рекомендуемые скорости резания для быстрорежущих сталей не должны превышать 50 м/мин; для твёрдых сплавов — до 400 м/мин.
- Наиболее эффективной формой заточки являются инструменты с подрезающей режущей кромкой. Они обеспечивают наибольшую прочность конструкции и стойкость инструмента.
- Для обеспечения минимальной усадки отверстий в процессе сверления необходимо рекомендовать свёрла с подрезающей режущей кромкой или же для достижения номинального размера использовать свёрла на 0,1...0,3 мм больше указанного в чертеже.
- При выборе марки инструментального материала для свёрл необходимо применять материал с максимальным коэффициентом теплопроводности.

Список литературы

1. Забашта, В. Ф. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения [Текст] / В. Ф. Забашта, В. Г. Бондарь и др.. — К.: Техніка, 1993. — 160 с.
2. Игнатъев, И. С. Обработка пластмасс, применяемых в машиностроении [Текст] / И. С. Игнатъев. — М.: Машиностроение, 1965. — 220 с.
3. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов [Текст] / В. Н. Подураев. — М.: Высш. шк., 1974. — 475 с.
4. Итоги науки и техники. Авиационное. Т. 9. — М.: ВИНТИ, 1986. — 267 с.

5. Конструкционное материаловедение – Ч. 2, Неметаллы и композиты [Текст]: учебник / В. К. Борисевич, А. Ф. Виноградский, Я. С. Карпов и др. — Харьков: «ХАИ», 2002. — 342 с.

6. Молодцов, Г. А. Напряженные элементы конструкций летательных аппаратов из КМ [Текст] / Г. А. Молодцов. — М.: Машиностроение, 1993. — 224 с.

7. Джанхотов, С. О. Экспериментальные исследования характеристик упругости и прочности многослойного углепластика при сдвиге в плоскости армирования [Текст] / С. О. Джанхотов // РТМ. Проектирование, расчет и испытания конструкций из КМ. — ЦАГИ, 1989. — С. 63 — 72.

8. Киркач, А. Б. Проблема прочности болтовых соединений на основе слоистых композиционных пластиков [Текст] / А. Б. Киркач. — Х: НТУ «ХПИ», 2011.

9. Schurmann H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden/H. Schurmann-Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Ausgabe, 2007.

Поступила в редакцию 11.03.2016

Вплив технологічних параметрів процесу свердління КМ на міцність

Досліджено вплив технологічних параметрів процесу свердління полімерних композиційних матеріалів на міцність. Показано залежність міцності зразків з вугле-, скло-, органічних пластиків від швидкості різання, форми заточування свердел, температури в зоні різання і марки інструментального матеріалу. Рекомендовано оптимальні швидкості різання і марки інструментального матеріалу.

Ключові слова: композиційні матеріали; свердла: стандартні, перові, з підрізаними крайками; температура різання; вугле-, скло-, органічні пластики; теплопровідність; сталь швидкоріжуча; твердий сплав; термопластик; термореактивні ламінації; шаруваті КМ; напруга; геометричні та технологічні параметри; свердління; структура армування; болтове з'єднання; якість поверхні; шорсткість усадка отворів; пірометр; фізико-механічні властивості; сполучні; наповнювач; стійкість; форма заточування.

Influence of Technological Parameters of Drilling CM Strength

The effect of technological parameters of the drilling process, the polymer composition materials for durability. We investigated the dependence of the strength of samples of carbon, glass, organic plastics on the cutting speed, shape sharpening drills, the temperature in the cutting zone and mark the tool material. Recommended optimum cutting speed and tool material grade.

Keywords: composite materials; drills: standard, Feather, with clipped edges; cutting temperature; carbon, glass, organoplastics; thermal conductivity; high-speed steel; hard alloy; thermoplastic; thermosetting laminates; layered CM; voltage; geometric and technological parameters; drilling; reinforcing structure; bolted connection; surface quality; roughness; shrinkage holes; pyrometer; physical and mechanical properties; binder; filler; resistance; shape sharpening.