

Влияние технологических параметров процесса сверления на статическую прочность болтовых соединений ПКМ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»
Национальный технический университет «КПИ»
Государственное предприятие «Антонов»*

Рассмотрены вопросы обработки сверлением полимерных композиционных материалов. Исследованные технологические параметры и определены оптимальные режимы резания.

Ключевые слова: геометрические параметры, режущая часть, болтовые соединения, режимы резания.

Для самолетов наряду с минимальными значением взлетной массы, одним из важнейших показателей являются ресурс и надежность планера. Обеспечение и гарантия этих требований начинается с проектирования и изготовления современных ЛА. По статистике, для дальних магистральных самолетов ресурс составляет 10 тысяч полетов (50 тысяч летных часов), для самолетов местных воздушных линий до 50 тысяч полетов (80 тысяч часов) при сроке их эксплуатации 25–30 лет [1, 2].

На эксплуатационные свойства деталей, кроме оговоренных чертежом точности, шероховатости рабочих поверхностей, марки материала и других требований, значительное влияние оказывают методы и технологические режимы обработки. К примеру, поверхности обработанные с заданной точностью и шероховатостью могут иметь различную степень и величину остаточных напряжений, нарушение целостности поверхностного слоя, за счет микротрещин, задиров и разрыхлений. Может иметь место искажение химического состава и структуры поверхностного слоя материала, в результате выделения в зоне обработки значительного количества тепла, оказывающего влияние на адгезионные свойства матрицы с наполнителем [3, 4].

В случае использования в интегральных конструкциях полимерных композиционных материалов существует несколько видов их соединений между собой и с другими материалами. Так например, адгезионные или клеевые соединения, а также болтовые и заклепочные. Болтовые соединения по сравнению с другими, имеют преимущества по их технологичности, малой чувствительности к атмосферным воздействиям и возможностью неразрушающей разборки [5].

Прочность болтовых соединений определяется уровнем концентрации напряжений около отверстий. Как правило, разрушение всегда начинается в зоне поверхности отверстий вне зависимости от вида приложенной нагрузки. Характер разрушения, вследствие практически линейной зависимости диаграммы деформирования до разрушения, обуславливает необходимый учет концентрации напряжений при выполнении механических соединений и оценки их прочностных характеристик [3, 5, 6].

Несмотря на то, что ПКМ получили широкое распространение в технике, данные о влиянии технологических параметров обработки отверстий на их статическую прочность крайне малочисленны [7].

При изготовлении конструкций из ПКМ в силу своей природы и методов их изготовления, волокнистые композиты считаются самонапряженными системами, в них образуются технологические остаточные напряжения и деформации. В настоящее время для ПКМ предложена следующая классификация технологических напряжений в зависимости от зоны, на которой они действуют:

- остаточные напряжения первого рода, зона их действия ограничивается конструктивными размерами элементов (например, толщиной стенки);
- остаточные напряжения второго рода, зона действия их ограничивается одним слоем, находящимся в слоистой конструкции;
- остаточные напряжения третьего рода, для них зона действия ограничивается размерами волокна и окружающей его матрицы (структурные остаточные напряжения) [2, 3].

Целью работы, является исследование технологических параметров процесса сверления слоистых ПКМ на статическую прочность образцов под болтовые соединения.

Первая серия испытаний проводилась на образцах из угле-, стекло- и органопластиков с концентраторами напряжений в виде отверстий $\varnothing 5$ мм, представленных на рис. 1.

Для исследований были изготовлены образцы из углепластика. Угленополнитель марки ЭЛУР-П-01 на связующем 5-211-БН, из 10 слоев (толщиной ~ 1 мм), с симметричной схемой укладки $[90^\circ; \mp 45^\circ; 0^\circ; 0^\circ; \pm 45^\circ; 90^\circ]_S$ с той целью, чтобы избежать эффекта крутки. Образцы из стеклопластика Т-10-14 и органопластика Т-42/1-76 со схемой укладки $[90^\circ; 0^\circ; 0^\circ; 90^\circ]_S$, толщиной 1,8 мм (8 слоев). Для каждой марки материала было изготовлено по 3 образца, размерами после фрезерования 220x20 мм в соответствии с технологической инструкцией ДП «Антонов» ТИ-59-1110-09. Отверстия диаметром 5 мм вскрывались по центру образца в кондукторе (рис. 1.).

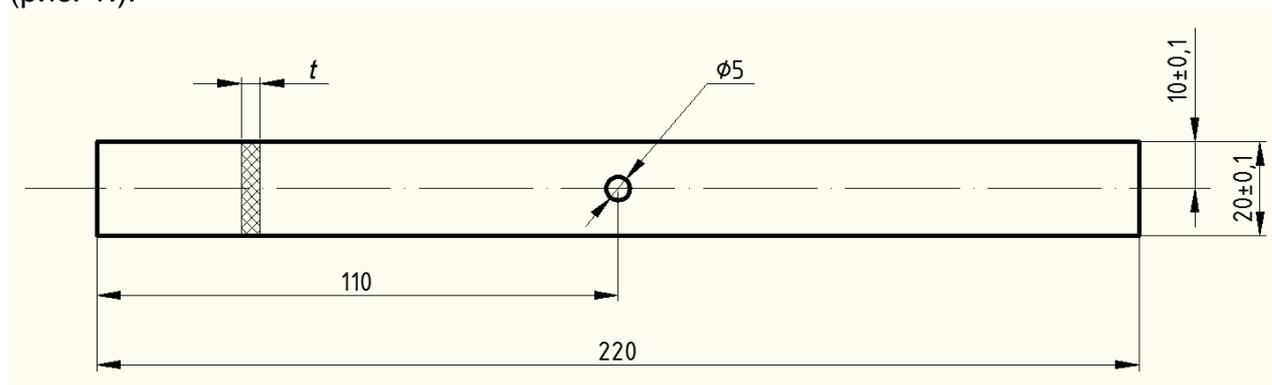


Рис. 1. Образцы из углепластика $t \approx 1$ мм;
из стеклопластика и органопластика $t \approx 1,8$ мм

Сверление отверстий производилось на станке НС-12 стандартными, перовыми и сверлами с подрезающей режущей кромкой (ПРК) со скоростью вращения от 450 об/мин до 4500 об/мин, с подачей 0,1 мм/об согласно технологическим рекомендациям ТИ-36-39-89. После сверления диаметры отверстий замерялись инструментом с ценой деления шкалы 0,01 мм. По

результатам замеров был построен график усадки отверстий (Δ мкм) в зависимости от скорости сверления v м/мин (рис. 2.).

Уменьшение размеров отверстий необходимо учитывать при проектировании технологических процессов, т. е. режима резания и геометрии режущего инструмента, включая марку режущего инструмента.

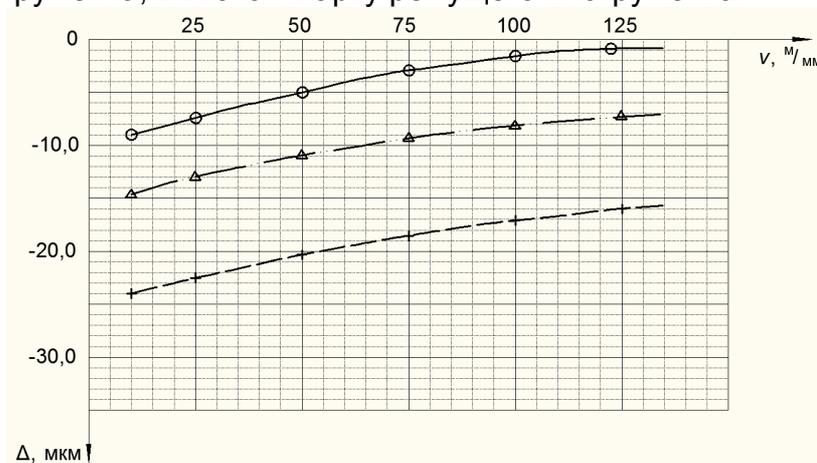


Рис. 2. График зависимости усадки отверстий, в углепластике в зависимости от скорости сверления v м/мин (\circ – ПРК, Δ – стандартное, $+$ – перовое)

В технической литературе принято считать, что коэффициент усадки для ПКМ находится в пределах 2–20 % и зависит он также от типа связующего и наполнителя [2].

Конструктивно–геометрические параметры сверл принятые для исследования представлены в табл.1.

Таблица 1

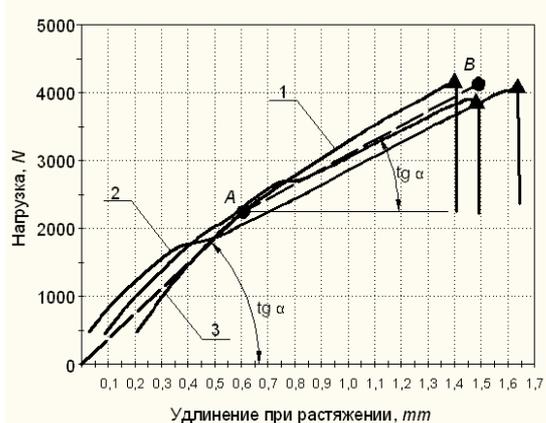
Конструктивно–геометрические параметры сверл

Тип сверла	Марка режущей части инструмента	Конструктивно–геометрические параметры							Допустимая величина износа h , мм
		d , мм	γ°	α°	$2\varphi^\circ$	β°	ω°	Δ , мм	
<p>Стандартное</p>	P18	5	18	15	110	—	—	—	0,25
<p>Перовое</p>	ВК8	5	18	15	110	—	—	—	0,25
<p>ПРК</p>	P18	5	18	12	120	45	—	0,5	0,25

На основании анализа графика можно сделать следующие выводы:

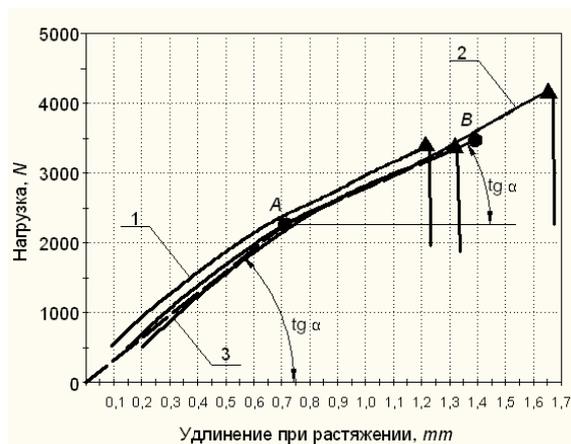
- при сверлении углепластика сверлами с ПРК отверстия образуются с минимальной усадкой (Δ мкм);
- с увеличением скорости резанья до 100 м/мин происходит незначительное снижение усадки отверстий;
- при сверлении перовыми сверлами, образуется максимальная усадка отверстий (до 0,25-0,30 мкм).

Результаты статических испытаний образцов на установке Instron 5582 представлены на рис. 3 а, б, в.



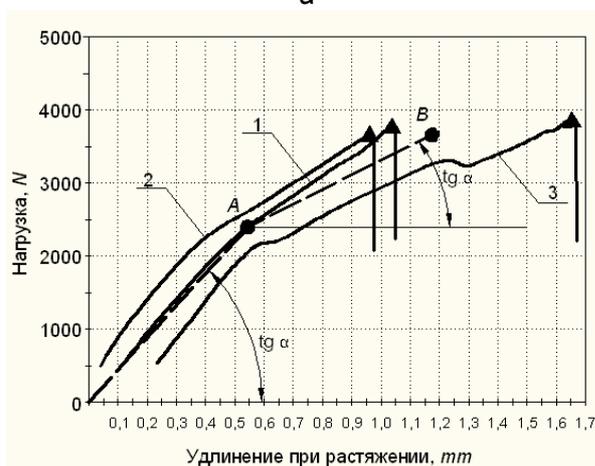
	Вид испытаний и база испытаний, характеристика образцов	Толщина (mm)	Ширина (mm)	Разруш. усилие (N)	Предел прочн. (MPa)
1	растяжение	0,99	15,29	4160	275
2	сверло с ПРК	0,98	15,27	4357	291
3	углепластик	0,97	15,33	4427	298
Средн.		0,98	15,30	4315	288

а



	Вид испытаний и база испытаний, характеристика образцов	Толщина (mm)	Ширина (mm)	Разруш. усилие (N)	Предел прочн. (MPa)
1	растяжение	0,97	15,30	3671	247
2	сверло с ПРК	1,02	15,30	4552	292
3	углепластик	1,01	15,30	3656	237
Средн.		1,00	15,30	3960	259

б



	Вид испытаний и база испытаний, характеристика образцов	Толщина (mm)	Ширина (mm)	Разруш. усилие (N)	Предел прочн. (MPa)
1	растяжение	0,99	15,20	4127	274
2	сверло с ПРК	0,97	15,30	3880	261
3	углепластик	0,92	15,25	3998	285
Средн.		0,96	15,25	4001	274

в

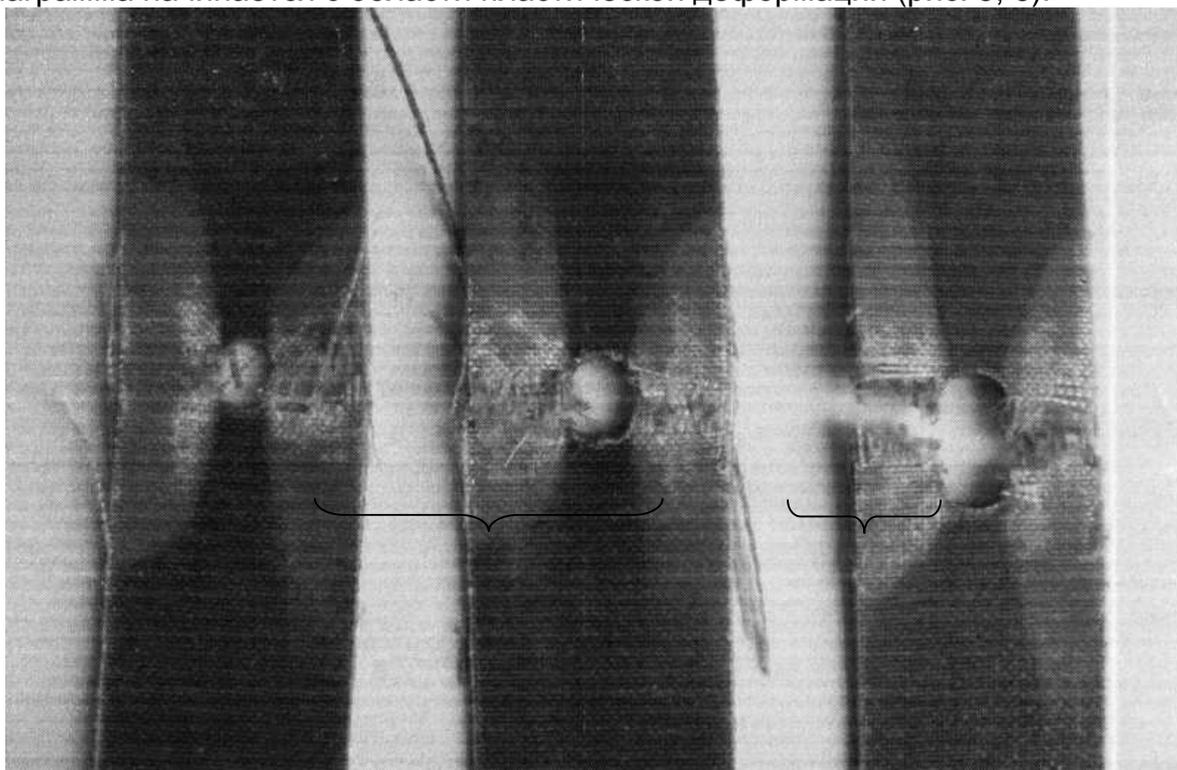
Рис. 3. Диаграмма растяжения образцов из углепластика при сверлении сверлами: а) ПРК; б) перовое; в) стандартное

Полученные при статических испытаниях диаграммы растяжений для образцов из углепластика имеют два, четко выраженных участка характерные для всех видов испытываемых сверл. Первый участок (ОА) имеет более крутой подъём по отношению к вектору удлинения, его можно охарактеризовать тангенсом (tg) угла наклона. Зона этого участка диаграммы располагается в пределах до 1/3 диапазона удлинения образца до разрыва. За ним располагается линейный участок АВ, который имеет меньший угол наклона к вектору удлинения. На рис. 4 представлен образец разрыва из стекло- и органоластика.

Объяснить это можно тем, что в начальный период удлинение в пластине происходит за счет межслоевого сдвига отдельных слоев, в дальнейшем диаграмма в точке А переходит в область пластических деформаций несущих слоев.

На практике, до катастрофического разрушения образцов предварительно проявляются два эффекта: акустический и оптический. Акустический в форме «потрескивания» и оптический в виде изменения цвета в районе отверстия-концентратора напряжений, см рис. 4. Подобное явление было отмечено и другими авторами при исследовании упругости и прочности слоистого углепластика при сдвиге в плоскости армирования [4, 5].

Для диаграмм растяжения стекло- и органоластиков участок с межслоевым сдвигом имеет незначительную величину, практически отсутствует, диаграмма начинается с области пластической деформации (рис. 5, 6).



а б
Рис. 4. Образцы после испытаний на растяжение, а) стеклопластик; б) органопластик. Изменение цвета у отверстия – область межслоевого разрушения

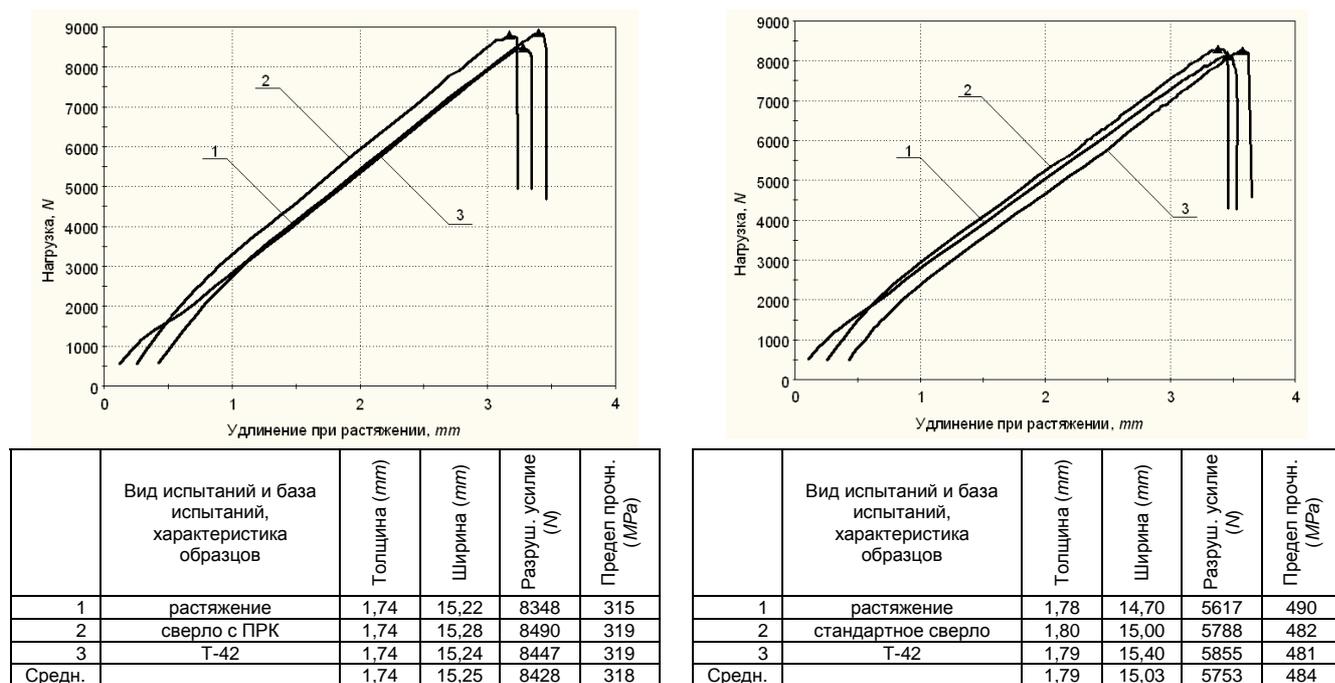


Рис. 5. Диаграмма растяжения образцов из стеклопластика с отверстиями от сверл: а) ПРК; б) стандартное, при $v=70$ М/мин.

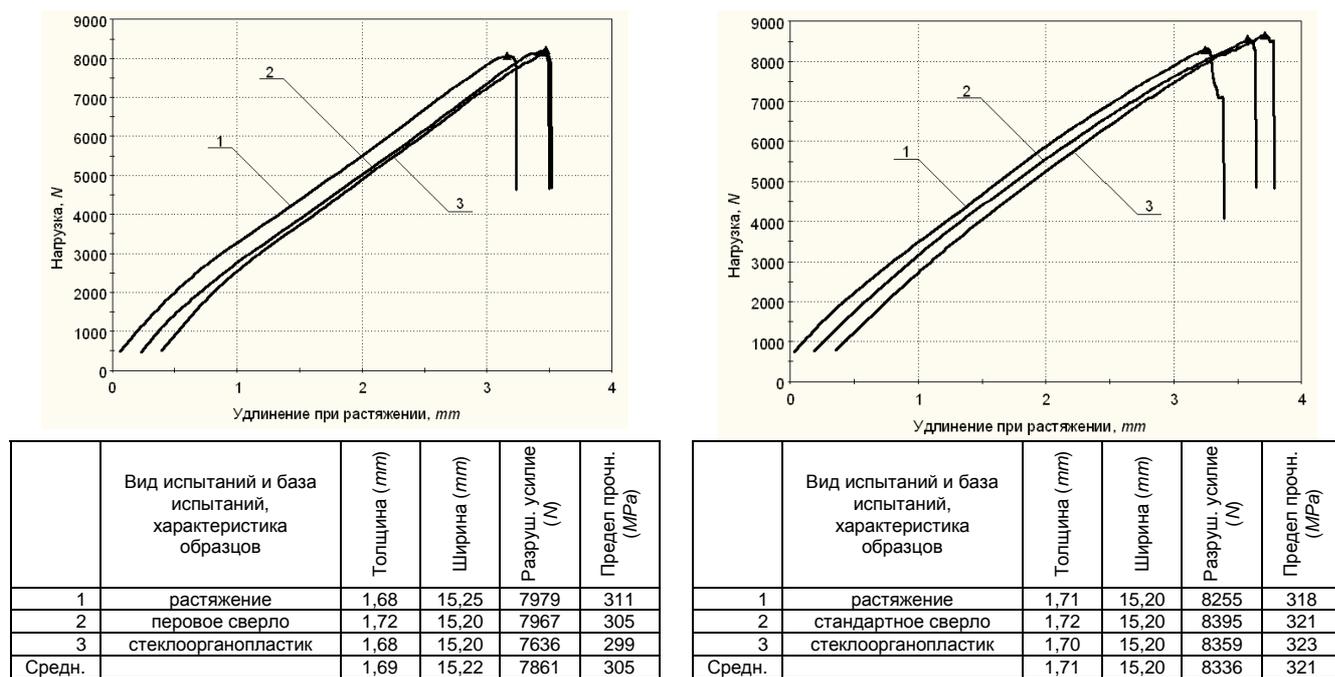
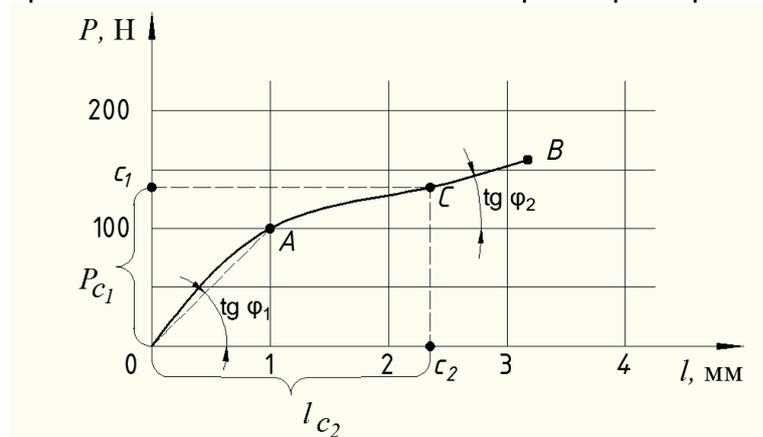


Рис. 6. Диаграмма растяжения образцов из органопластика с отверстиями от сверл: а) ПРК; б) стандартное, при $v=70$ М/мин.

Учитывая что, диаграмма растяжений имеет линейную зависимость, введем при исследованиях, такой относительный показатель, как приращение разрушающей нагрузки на единицу удлинения образца – ΔP (Н/мм). Различные типы волокнистых материалов, обладающих своими только им присущими физико–механическими показателями прочности, при обработке их, будут иметь

различную величину приращения разрушающей нагрузки – ΔP ($H/_{MM}$). Таким образом, по этому показателю можно будет вести сравнение эффективности применяемых технологических параметров при сверлении (рис. 7).



$$\Delta P_c = \frac{P_{c1}}{l_{c2}}, H/_{MM}$$

Рис. 7. Графическое представление расчета относительного приращения разрушающей нагрузки – ΔP ($H/_{MM}$).

В процессе исследования операций сверления ПКМ необходимо учитывать такие технологические параметры, как: режим резания, геометрию инструмента и марку инструментального материала. Указанные технологические параметры в основном отвечают за качество обрабатываемой поверхности и влияют на прочность соединений. От них в основном зависит температура в зоне резания и технологические остаточные напряжения, которые непосредственно влияют на прочностные показатели болтовых соединений.

Результаты исследований первой серии экспериментов по влиянию технологических параметров процесса сверления на статическую прочность образцов, полученных на установке Instron 5582, представлены в табл. 2 и 3.

Представленные на рис. 3, 5, 6. диаграммы растяжений образцов имеют незначительный разброс экспериментальных данных, в пределах 5-10%. Отношение предельной нагрузки $P_{кр.}$ к площади критического сечения образца условно назовем базовой прочностью $\sigma_б$. Анализ расчетных данных полученных на установке Instron 5582 и представленных в таблицах 2 и 3 позволяет сделать следующий вывод: сверла с подрезающими режущими кромками при сверлении ламинатов обеспечивают максимальную прочность $\sigma_б$.

Таблица 2

Средние показатели относительного приращения нагрузки и углов наклона диаграмм растяжения, полученных при испытании образцов на машине Instron 5582

Тип сверла	Марка режущего инструмента	Относительное приращения нагрузки ΔP , tg угла наклона диаграмм растяжения					
		углепластик		стеклопластик		органоластик	
		tg φ^0	$\Delta P H/_{MM}$	tg φ^0	$\Delta P H/_{MM}$	tg φ^0	$\Delta P H/_{MM}$
ПРК	P18	36	2700	39	1600	38	1520
Стандартное	P18	36	3100	39	2350	38	1600
Перовое	BK8	36	3900	39	2420	38	2430

Таблица 3

**Базовая прочность образцов-свидетелей с отверстием Ø5 мм при
растяжении**

Материал испытываемого образца	Вид инструмента	Ширина B , мм	Толщина t , мм	Разрушающее усилие $P_{кр.}$, Н	Базовая прочность ламината σ_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

Это объясняется тем, что кинематика процесса резания сверлами с подрезающими режущими кромками обеспечивает минимальную работу резания и меньшую температуру в зоне резания [7].

Ранее были проведены работы по влиянию отверстий (диаметром 1–5 мм). На прочность образцов на основе углеродной ленты ЭЛУР–П–01 и связующего 5-211-БН. Образцы имели две структуры армирования $[0_2; \mp 45^0; \bar{0}_4]_S$ и $[0^0; 90^0; \mp 45^0; 0^0; 90^0]_S$. Углепластики имели такой состав: объемное содержание волокна ~ 59%; содержание связующего ~ 40%; удельный вес ~ 1,5 г/см³. Испытания проводились при температурах 20° и 80°.

Результаты испытаний представлены на рис. 8, из которого видно, что с увеличением диаметра отверстий и температуры, снижается прочность образцов.

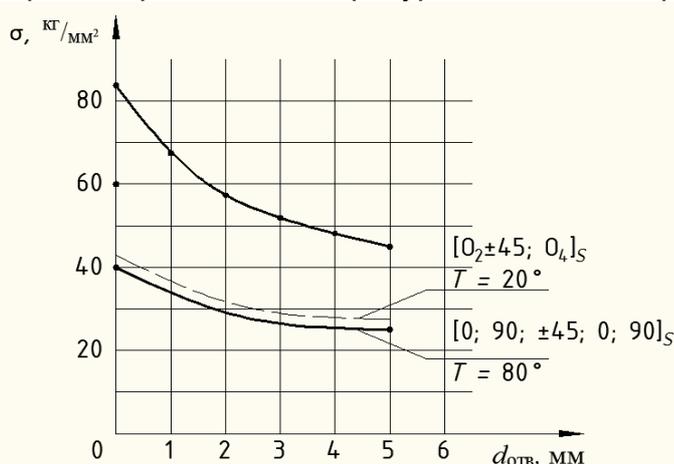


Рис. 8. График изменения прочности образцов σ_b из углепластика в зависимости от диаметра отверстий и температуры испытаний

Вторая серия экспериментов проводилась на образцах 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 соединялись болтами М5 ОСТ-131528-80 с прижимными шайбами $\varnothing 10$ мм с двух сторон в соответствии с рис. 9

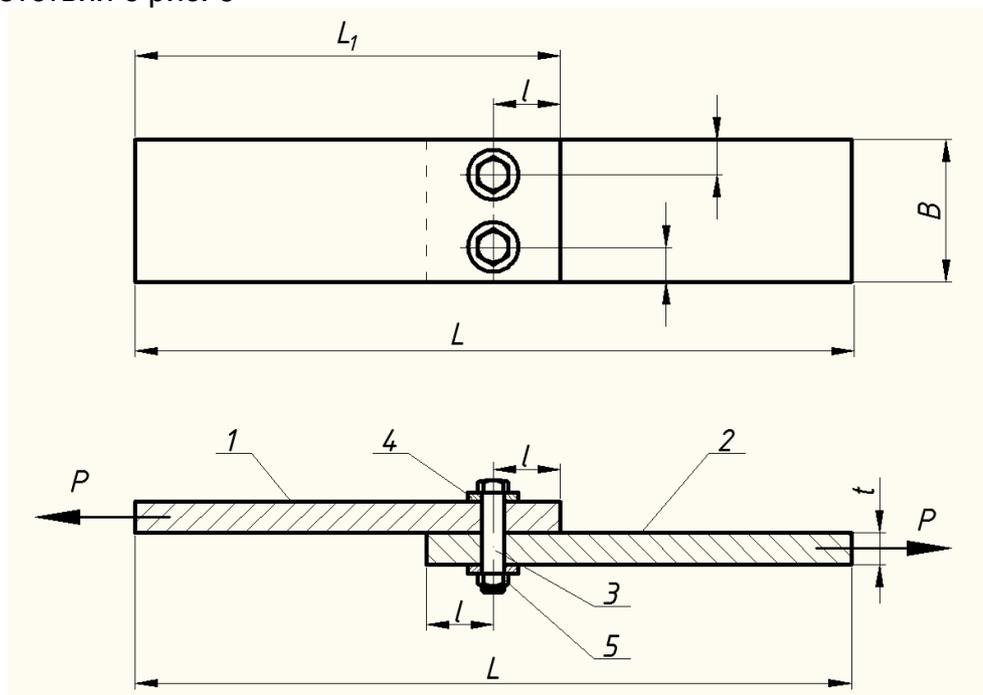


Рис. 9. Схема болтового соединения двух пластин из углепластика. 1, 2 – пластины; 3 – болт М5, 4 – шайбы; 5 – гайка.

Затяжка болтового соединения производилась с крутящим моментом 4-6 кгм. В качестве варьируемых технологических параметров были приняты скорость резания и геометрические данные типов инструмента. Для каждой серии было изготовлено по 5 штук образцов. Диаграммы растяжений статических испытаний образцов болтовых соединений представлены на рис. 10, 11, 12.

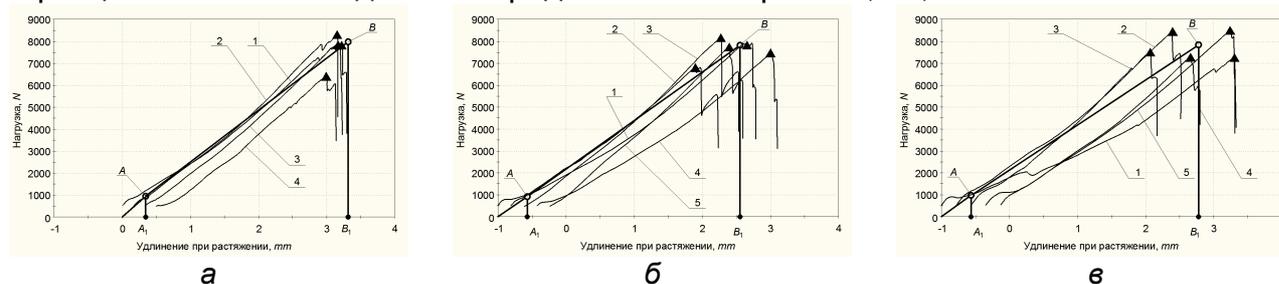


Рис. 10. Диаграмма растяжения образцов из углепластика с болтовым соединением при сверлении ПРК на оборотах: а) $n=450 \text{ об/мин}$; б) $n=1400 \text{ об/мин}$; в) $n=2500 \text{ об/мин}$.

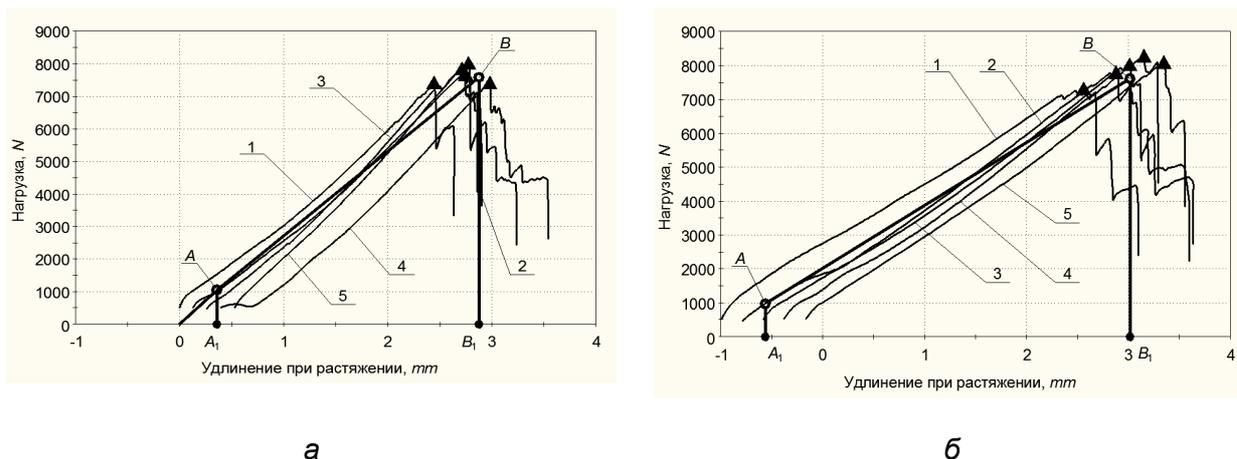


Рис. 11. Диаграмма растяжения образцов из углепластика с болтовым соединением при сверлении стандартным сверлом на оборотах: а) $n=450$ ^{об}/мин ; б) $n=1400$ ^{об}/мин .

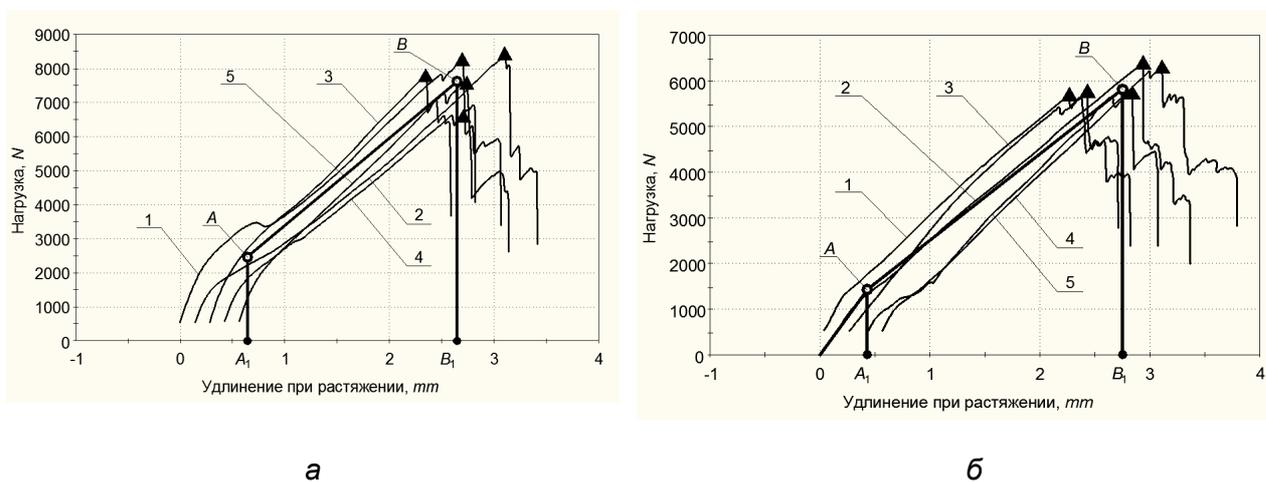


Рис. 12. Диаграмма растяжения образцов из углепластика с болтовым соединением при сверлении перовым сверлом на оборотах: а) $n=450$ ^{об}/мин ; б) $n=2500$ ^{об}/мин .

Представленные диаграммы растяжений болтовых соединений при статических испытаниях, так же как и в предыдущей серии испытаний, имеют незначительный разброс критических точек разрушения, в пределах 5÷10%. Результаты экспериментальных данных полученных на установке Instron 5582 представлены в табл. 4.

Таблица 4

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

Вид инструмента	Ширина B , мм	Толщина t , мм	Скорость резанья V м/мин	Разрушающее усилие $P_{кр.}$, Н	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

На основании анализа данных каждой серии экспериментов, представленных в табл. 4, можно сделать следующие выводы:

- сверла с подрезающей режущей кромкой (ПРК) обеспечивают высокое качество отверстий и тем самым обеспечивают максимальные прочностные показатели болтового соединения, по сравнению с другими сверлами;
- для обеспечения максимальных прочностных показателей болтового соединения, необходимо сверление производить на скоростях 25–50 м/мин.

Выводы

С целью обеспечения максимальных прочностных показателей для болтовых соединений из полимерных композиционных материалов сверление необходимо производить сверлами с подрезающей режущей кромкой.

Максимальное влияние на точность и качество отверстий в полимерных композиционных материалах оказывает скорость резания.

Для обработки угле- и стеклопластиков наиболее оптимальной маркой инструментального материала является твердый сплав ВК6, ВК8.

Список литературы

1. Итоги науки и техники. Авиационное, том 9. – М. ВИНТИ, 1986.- 267с.:ил.
2. В.К. Борисевич, А.Ф. Виноградский, Я.С. Карпов и др. Учебник: Конструкционное -материаловедение. Часть 2, Неметаллы и композиты. Харьков «ХАИ», 2002 г. 342с, ил.
3. Г.А. Молодцов. Напряженные элементы конструкций летательных аппаратов из КМ.-М. Машиностроение, 1993. 224с.; ил.
4. РТМ. Проектирование, расчет и испытания конструкций из КМ. ЦАГИ, 1989. С 63-72. С.О. Джанхотов «Экспериментальные исследования характеристик упругости и прочности многослойного углепластика при сдвиге в плоскости армирования.
5. А.Б. Киркач. Проблемы прочности болтовых соединений на основе слоистых композиционных пластиков. Харьков. НТУ «ХПИ», 2011.
6. Schürmanna H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden/H.

Schürmann-Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Ausgabe, 2007.

7. Krivov G.A. and Lupkin B.V. Machuining of polimer Composite materials.// Composite Manufacturing Technology. -1995. 1. London . p. 155-218.

Рецензент: д.т.н., проф. С.А. Бычков, АНТК “Антонов”, Киев

Поступила в редакцию 09.09.2013

Влияние технологических параметров процесса сверления на статическую прочность болтовых соединений ПКМ

Рассмотрены вопросы обработки сверлением полимерных композиционных материалов. Исследованные технологические параметры и определены оптимальные режимы резания.

Ключевые слова: геометрические параметры, режущая часть, болтовые соединения, режимы резанья.

Влияние технологических параметров процесса сверления на статическую прочность болтовых соединений ПКМ

Рассмотрены вопросы обработки сверлением полимерных композиционных материалов. Исследованные технологические параметры и определены оптимальные режимы резания.

Ключевые слова: геометрические параметры, режущая часть, болтовые соединения, режимы резанья.