

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

Ю.А. Вашуков А.С. Горячев В.П. Самохвалов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ И УЗЛАХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

САМАРА 1996

Технологические особенности получения отверстий в деталях и узлах летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов: Учеб. пособие/ Ю.А. Ващуков, А.С. Горячев, В.П. Самохвалов; Под ред. В.А. Барвинка; Самар. аэрокосм. ун-т. / Самара, 1996. 44 с. ISBN 5-230-17003-4.

Подробно рассмотрены конструкционные свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) и их преимущества по сравнению с металлическими материалами, наиболее широко применяемыми в производстве летательных аппаратов; даны рекомендации по получению отверстий в листовых деталях и узлах из ПКМ сверлением и пробивкой.

Предназначено для студентов авиационно-космических вузов по специальностям 1301, 1306 дневной и вечерней форм обучения, а также слушателей ФПК. Подготовлены на кафедре производства летательных аппаратов. Ил.15. Табл. 14. Библиогр.: 18 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензенты: Г. М. Аноприенко, В. А. Барвинок

© Ю.А. Ващуков, А.С. Горячев,
В.П. Самохвалов

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 1996

В в е д е н и е

Среди широкого класса постоянно совершенствующихся композиционных материалов (КМ), применяемых в конструкциях летательных аппаратов (ЛА), наиболее перспективными считаются композиционные материалы с полимерным связующим на основе непрерывных стеклянных, углеродных, борных, органических и других волокон. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) хорошо зарекомендовали себя в отечественной и зарубежной практике производства ЛА в таких конструкциях, где в полной мере проявляются их наиболее очевидные достоинства: высокие удельные прочность и жесткость, технологичность, сравнительно низкая стоимость.

Это в особенности относится к производству ЛА, где широко применяются механические точечные соединения с использованием заклепок и болтов. Как известно, на надежность этих соединений оказывает большое влияние качество полученных отверстий.

Технология получения качественных отверстий остается одной из актуальных проблем в производстве, так как ПКМ являются анизотропными материалами, имеющими волокнистую структуру с различными связующими. Указанные факторы могут способствовать появлению различного рода дефектов (скалывания, разрушения волокон, смятия), а значит, могут вызвать снижение надежности соединения.

Поэтому авторы данного учебного пособия рассматривают операции получения отверстий под точечные соединения с учетом особенностей деталей и узлов ЛА, изготавливаемых из ПКМ.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Композит представляет собой неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики, и матрицу (или связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов. Поведение композита определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность материала зависит от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик. В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композита, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий в себя свойства, которыми изолированные компоненты не обладают.

1.1. АРМИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В полимерных композиционных материалах используются непрерывные и короткие волокна диаметром $(5...200) \cdot 10^{-6}$ м, которые являются армирующими элементами или служат основой для изготовления нитей, жгутов, лент и тканей с различными типами плетения.

В настоящее время при изготовлении ПКМ в основном применяются стеклянные, борные, углеродистые и высокомодульные органические волокна.

Непрерывные стеклянные волокна образуются из расплавленной стекломассы путем вытягивания струн на выходе из фильер до

диаметра $(5...20) \cdot 10^{-6}$ м и быстрого охлаждения. Предел прочности полученных волокон составляет 2...6 ГПа, модуль упругости 50...130 ГПа, плотность 2500...2600 кг/м³. Температура оказывает существенное влияние на прочность стеклянных волокон.

Предел прочности промышленных стеклянных волокон при понижении температуры до 77 К возрастает в 1,5...2,0 раза, а с повышением температуры снижается, причем наиболее интенсивно после температуры 573 К. Модуль упругости стеклянных волокон с повышением температуры до температуры размягчения уменьшается незначительно.

При изготовлении ПКМ стеклянные волокна используются в виде первичных нитей, прядей нескрученных нитей, крученых нитей и тканей на их основе. Текстильная обработка заметно снижает предел прочности стеклянных волокон. Их достоинством является высокая прочность при растяжении и сжатии, сравнительно низкая стоимость исходных материалов и процесса изготовления, хорошая совместимость с полимерными матрицами и технологичность. Недостатки связаны с низким модулем упругости и сравнительно низкой теплостойкостью.

Углеродистые волокна применяют в виде жгутов, лент и тканей. Они являются более хрупкими и менее технологичными, чем стеклянные, отличаются химической инертностью, низкой поверхностной энергией, обуславливающей плохое смачивание волокон растворами и расплавами матричных материалов, что в итоге приводит к низкой прочности сцепления на границе волокно-матрица. Основным достоинством углеродистых волокон является их более высокая по сравнению со стеклянными волокнами жесткость. Механические характеристики углеродистых волокон сохраняются неизменными при повышении температуры до 723 К, что позволяет применять их в композитах как с полимерной, так и с металлической матрицей.

Борные волокна получают осаждением бора на нагреваемую вольфрамовую нить диаметром $(12...16) \cdot 10^{-6}$ м. При таком процессе вокруг нити формируется борная оболочка, частично прореагировавшая с материалом нити. В настоящее время выпускаются волокна диаметром $(100...200) \cdot 10^{-6}$ м, имеющие предел прочности при растяжении 2...4 ГПа, модуль упругости 370...430 ГПа, плотность 2500...2700 кг/м³. Борные волокна обладают высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, этим объясняется их большая прочность при сжатии, чем при растяжении. С повышением

температуры заметное разупрочнение волокон бора на воздухе начинается с температуры 673 К. Для предотвращения окислительной деструкции на поверхность волокон наносят тугоплавкие покрытия из карбидов кремния или бора толщиной $(2...6) \cdot 10^{-6}$ м.

Волокна бора выпускаются в виде моноволокон, комплексных нитей, лент. Борные волокна хорошо совмещаются как с полимерной, так и с металлической матрицей. Их основными достоинствами являются высокие жесткость и прочность при сжатии, а к недостаткам можно отнести высокую стоимость, хрупкость и связанную с ней низкую технологичность, большую толщину элементарного слоя, определяемую диаметром волокон.

Высокомодульные органические волокна получают из концентрированных растворов полимеров формированием через фильеры. Далее волокна пропускают через ванны осаждения, где удаляется основная часть растворителя, после чего осуществляют ориентационную вытяжку и фиксацию структуры волокон.

В зависимости от состава полимера и метода формования получают органические волокна, имеющие плотность 1410...1450 кг/м³, предел прочности при растяжении 1,8...3,0 ГПа, модуль упругости 70...130 ГПа. Волокно сохраняет исходные характеристики при температуре до 453К, а при повышении температуры, не плавясь, карбонизируется. Криогенные температуры не вызывают охрупчивания. При достаточно высоком модуле упругости и большом предельном удлинении (до 2%) органические волокна обладают высокой ударной вязкостью и малой чувствительностью к повреждениям. Органические волокна хорошо воспринимают растягивающие нагрузки. По удельной прочности и жесткости они превосходят стеклянные волокна. ПКМ на основе органических волокон при сжатии значительно уступают стеклопластикам. Данные волокна обладают хорошей технологичностью, однако совмещаются с полимерными связующими хуже, чем стеклянные.

Ориентировочные характеристики волокон, применяющихся в настоящее время в композитах, представлены в табл. 1.

Можно отметить, что по удельной жесткости высокомодульные углеродистые волокна превосходят все прочие; наибольшую удельную прочность имеют высокопрочные и органические волокна. Борные и углеродистые волокна обладают высокой удельной прочностью и высоким удельным модулем. Наиболее перспективным в настоящее время считаются углеродистые волокна. Их свойства непрерывно совершенствуются, а стоимость снижается.

Физико-механические характеристики волокон

Параметр	Стекланное	Углеродистое		Борное	Органическое
		высокомодульное	высокопрочное		
Плотность, 10^{-3} кг/м ³	2,5	1,95	1,76	2,5	1,45
Модуль упругости, ГПа	89	400	260	400	120
Предел прочности при растяжении, ГПа	3,5	2,1	3,3	3,5	2,8
Удельная жесткость, 10^{-6} м	3,6	20,3	14,7	16	8,3
Удельная прочность, 10^{-3} м	140	108	187	140	193

1.2. СВЯЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

В полимерных композитах армирующие элементы соединены изотропной полимерной матрицей, которая обеспечивает монолитность материала, фиксирует форму изделия, способствует совместной работе волокон и перераспределяет нагрузку при разрушении части волокон. Природа матрицы определяет уровень рабочих температур композита, характеризует устойчивость материала к воздействию внешней среды, химическую стойкость, частично теплофизические, электрические и другие свойства. Технологические характеристики матрицы определяют процесс получения композита и изделия из него. Основным содержанием этих процессов является совмещение армирующих волокон с матрицей и окончательное образование изделия, что определяет следующие требования к материалу матрицы: хорошее смачивание волокна жидкой матрицей в процессе пропитки; возможность предварительного изготовления полуфабрикатов (препрегов) с последующим изготовлением из них изделий; качественное соединение слоев композита в процессе формования; невысокие значения параметров окончательного формообразования (температуры, давления); обеспечение высокой прочности сцепления матрицы с волокном. Все полимерные связующие можно разделить на термореактивные и термопластичные.

1.2.1. Термореактивные полимерные связующие

Эти связующие образуются из смолы, отвердителя, катализатора и растворителя. В исходном состоянии связующее представляет собой вязкую жидкость, которая в результате полимеризации при

нормальной или повышенной температуре отверждается и переходит в нерастворимую и неплавкую матрицу. В производстве конструкций из ПКМ наиболее широкое применение находят полиэфирные, фенолоформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические и полиимидные связующие. Физико-механические свойства связующих представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические характеристики отвержденных термореактивных связующих

Параметр	Полиэфирные	Фенолоформальдегидные	Эпоксидные	Кремнийорганические	Полиимидные
Предел прочности при растяжении, МПа	30-70	40-70	35-100	25-50	90-95
То же при сжатии, МПа	80-150	100-125	90-160	60-100	250-280
Модуль упругости, ГПа	2,8-3,8	7-11	2,4-4,2	6,8-10	3,2-5
Плотность, 10^{-3} кг/м ³	1,2-1,35	1,2-1,3	1,2-1,3	1,35-1,4	1,41-1,43
Теплостойкость, К	323-353	413-453	403-423	523-553	523-593
Относительное удлинение, %	1,0-5,0	0,4-0,5	2-9	0,3-0,5	1-2,5
Объемная усадка, %	5-10	15-25	1-5	15-20	3-20

Полиэфирные связующие, отверждаемые при нормальной или повышенной температуре, характеризуются высокой стойкостью к действию воды, минеральных масел, неорганических кислот, многих органических растворителей, хорошими диэлектрическими свойствами. К преимуществам полиэфирных связующих относятся следующие: малая вязкость полимеров, обеспечивающая простоту совмещения их с волокнами; способность отверждаться в широком температурном интервале без применения высоких давлений; простота модифицирования другими смолами. К недостаткам – невысокий уровень механических характеристик, слабая адгезия, малая жизнеспособность, относительно большая усадка и наличие в составе токсичных веществ типа стирола.

Фенолоформальдегидные связующие отверждаются при температуре 433-473 К с применением значительного давления порядка 30-40 МПа и выше. Получаемые в результате полимеры стабильны при длительном нагревании до 473К, а в течение ограниченного времени способны противостоять действию и более высоких температур – несколько суток при температуре 473...523 К, несколько часов при 523...773 К. К недостаткам фенолоформальдегидных смол можно отнести их хрупкость и значительную объемную усадку (15...25%) при отверждении, связанную с выделением большого количества летучих веществ.

Эпоксидные связующие обладают комплексом благоприятных свойств, определивших их широкое применение в производстве ПКМ. К этим свойствам относятся следующие: высокие механические и адгезионные характеристики, позволяющие достаточно полно использовать свойства армирующих волокон, хорошая технологичность связующих. Отверждение смол можно осуществлять при необходимости в широком интервале температур, и оно протекает без выделения летучих веществ с малой объемной усадкой 1...5%. Отвержденные эпоксидные связующие имеют достаточно высокие механические характеристики, стойки к действию многих растворителей и агрессивных сред, влагостойки и могут эксплуатироваться при температуре до 423 К.

Кремнийорганические связующие характеризуются работоспособностью в широком интервале температур (от 73 до 623 К), стойкостью к действию органических растворителей и минеральных кислот, высокими диэлектрическими свойствами. К недостаткам относятся низкие по сравнению с другими связующими механические свойства при невысоких температурах (до 373 К), необходимость значительных давлений при формовании изделий, длительный цикл отверждения и высокая стоимость. Полиимидные связующие отверждаются при сравнительно высокой температуре (573...623 К), отличаются высокой теплостойкостью, хорошими механическими характеристиками и стойкостью к действию различных агрессивных сред, стабильностью размеров в широком интервале температур. К недостаткам полиимидных связующих относятся значительные технологические трудности изготовления изделия из материалов на их основе, связанные с высокой температурой отверждения.

1.2.2. Термопластичные полимерные связующие

Связующие этого вида характеризуются тем, что при нагревании расплавляются, а при последующем охлаждении затвердевают. Преимущества термопластичных связующих по сравнению с терморезистивными определяются неограниченной жизнеспособностью полимера с завершённой химической структурой и отсутствием необходимости в длительном и энергоёмком процессе полимеризации. По уровню механических характеристик некоторые термопласты не уступают отвержденным терморезистивным связующим, а по таким свойствам, как химическая стойкость и герметичность, как правило, превосходят их (табл. 3). К недостаткам данных связующих относятся ярко выраженная зависимость свойств композитов на их основе

от температуры, низкая термостойкость термопластов и технологические трудности, связанные с высокой вязкостью их растворов и расплавов. Поэтому для качественной пропитки систем армирующих элементов требуются высокие давления, приводящие к разрушению арматуры.

Перспективные технологические процессы получения ПКМ на основе термопластичной матрицы предусматривают прессование или формование панелей и других элементов конструкций из предварительно подготовленных листов, образованных из панелей, тканей, лент и термопластичного полимера. Получаемые материалы характеризуются стабильностью структуры, легко обрабатываются и соединяются в процессе изготовления детали.

Характеристики некоторых видов термопластичной матрицы представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Физико-механические характеристики термопластичных полимерных связующих

Параметр	Нейлон	Полифенилен-сульфид	Сополимер этилена	Полисульфон	Полиэфир термопластичный
Предел прочности при растяжении, МПа	83	77	45	72	56
Модуль упругости, ГПа	2,8	4,2	1,4	2,7	2,5
Плотность, 10^{-3} кг/м ³	1,14	1,34	1,7	1,24	1,32
Теплостойкость, К	338	408	347	477	341
Относительное удлинение, %	10	3-4	150	50-100	10

1.3. СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПКМ

В зависимости от природы армирующих волокон различают следующие композиты на полимерной матрице: стеклопластики, углепластики, боропластики, органопластики.

Свойства композитов зависят не только от свойств волокон и матрицы, но и от способов армирования. На рис. 1 показаны типовые структуры композитов. Все виды структур ПКМ условно можно разделить на ориентированные материалы, армированные прямолинейными волокнами (рис. 1,а); композиты, армированные тканями (рис. 1,б); материалы, хаотически армированные непрерывными (рис. 1, в) или дискретными (рис. 1,г) волокнами; пространственно армированные системы (рис. 1, д).

Достоинства и высокие механические характеристики композитов наиболее полно реализуются в ориентированных материалах, армированных параллельными волокнами, т.е. в так называемых одно-

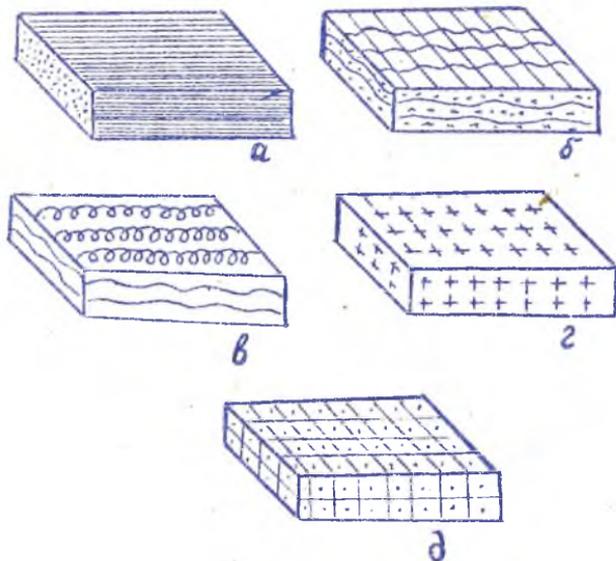


Рис. 1. Типовые структуры композитов: а – ориентированные материалы, армированные прямолинейными волокнами; б – армированные тканями; в – армированные хаотически; г – армированные дискретными волокнами; д – пространственно армированные материалы

направленных слоях или монослоях (рис. 1,а), из которых путем укладки в различных направлениях образуются слоистые композиты. Несмотря на большое многообразие структур, которые характеризуются числом слоев, их толщиной и взаимной ориентацией, свойства таких материалов определяются свойствами однонаправленного слоя. Эти свойства (ориентировочные) представлены в табл. 4 и иллюстрируются линиями, показанными на рис. 2.

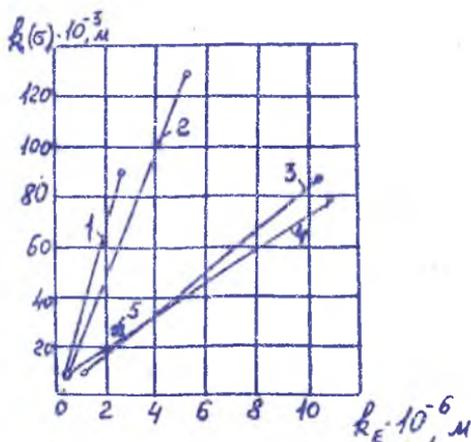


Рис. 2. Удельная прочность (K_G) и удельная жесткость (K_E) композитов: 1 – стеклопластик; 2 – органопластик; 3 – боропластик; 4 – углепластик; 5 – металлические сплавы

Верхние точки характеризуют удельную прочность и жесткость при растяжении вдоль волокон, а нижние – поперек волокон. Заплетенная прямоугольная область условно соответствует традиционным конструкционным материалам – металлическим сплавам. Из табл. 4 и рис. 2 следует, что по предельным характеристикам однонаправленные композиты значительно превосходят металлические сплавы, а по поперечным – существенно уступают им.

Таблица 4

Физико-механические характеристики однонаправленных композитов

Параметр	Стекло-пластик	Угле-пластик	Органо-пластик	Боро-пластик	Углерод-алюминий
Плотность, 10^{-3} кг/м ³	2,1	1,5	1,38	2,0	2,2
Предел прочности, ГПа при растяжении вдоль волокон	1,75	1,1	1,8	1,6	
при растяжении поперек волокон	0,034	0,033	0,028	0,065	
при сжатии	0,65	0,45	0,28	2,4	
вдоль волокон при сдвиге	0,048	0,027	0,042	0,102	
Удельная прочность при растяжении вдоль волокон, 10^{-3} м	83	73	130	80	
Модуль упругости, ГПа					
вдоль волокон	57	180	72	210	
поперек волокон	9	6,2	4,9	19	
Удельная жесткость, 10^{-6} м	2,7	12	5,3	10,5	
Модуль сдвига, ГПа	5,2	5,0	2,0	6,2	

Диаграмма формирования всех ориентированных композитов при растяжении и сжатии вдоль волокон в первом приближении можно считать линейными вплоть до разрушения материала.

Большинство применяемых волокон (исключение составляют борные волокна) в результате текстильной переработки позволяют получать ткани, которые широко используются в композитах в качестве армирующих элементов. Основным преимуществом таких материалов является их высокая технологичность, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий. В то же время текстильная переработка волокон и их искривление, появляющееся в результате переплетения, вызывают значительное снижение прочности и жесткости материала при нагружении в направлении армирования. Ткани обычно изготавливают из низко модульных стеклянных и органических волокон. В производстве композитов на основе тканей применяют в основном ткани полотняного и сатинового переплетения. Механические свойства материала зависят как от вида переплетения волокон, так и от соотношения волокон по основе и утку

Характеристики стеклотекстолитов на основе стеклотканей различного плетения

Вид тканей	Толщина ткани, мм	Плотность пластика, 10^{-3} кг/м ³	Содержание связующего, %	Предел прочности при растяжении, ГПа		Модуль упругости при растяжении, ГПа	
				Основна	Уток	Основна	Уток
Сатиновая	0,35	1,85	33,8	0,53	0,28	27	20
Полотняная	0,27	1,93	27,1	0,52	0,30	30	25

тканей. Типовые свойства материалов на основе стеклотканей различного переплетения представлены в табл. 5. Приведенные характеристики относятся к нагружению тканых материалов в направлении нитей основы или утка, однако характеристики тканых (армированных в ортогональных направлениях) композитов зависят от угла между направлениями нагрузки и нитей ткани. При действии нагрузки под углом к ориентации нитей прочность и жесткость материала в значительной мере определяются свойствами полимерного связующего. С увеличением этого угла модуль упругости и предел прочности снижаются, а модуль сдвига и коэффициент Пуассона возрастают, достигая максимальных значений при угле 45°.

Хаотически армированные композиты получаются в результате соединения полимерной матрицы с неориентированными непрерывными или короткими волокнами. Данные композиты получают путем расчленения расплавленной струи стекломассы потоком пара или газа. Изготовление изделий осуществляется методами прессования, напыления, контактным или вакуумным формованием. Механические свойства композитов повышаются с увеличением длины и степени ориентации волокон. Кривые деформирования таких материалов нелинейны. При изготовлении деталей в ряде случаев происходит некоторая ориентация волокон, степень которой зависит от конфигурации изделия и метода его изготовления. Это приводит к тому, что в различных деталях из одного и того же материала механические характеристики могут существенно различаться. Композит на основе полиэфирного связующего и стеклянных волокон, полученный прессованием, имеет плотность 1700 кг/м³, модуль упругости 12,4 ГПа и предел прочности при растяжении 138 МПа [1]. По удельным характеристикам они значительно уступают остальным ПКМ. Основными достоинствами волокнистых композитов с хаотическим расположением волокон являются

высокая технологичность и сравнительно низкая стоимость, в связи с чем их широко применяют для изготовления деталей несилевого назначения.

Существенным недостатком композитных материалов, образованных из армированных слоев, является их низкая прочность при межслоевом сдвиге, растяжении и сжатии, которая определяется матрицей. Этот недостаток в значительной мере устраняется при пространственном армировании. Образование композиций с пространственной структурой армирования возможно с помощью многослойных тканей, систем нитей, ориентированных в трех и более направлениях, а также с помощью дискретных волокон, размещаемых в пространстве между основными армирующими элементами.

В многослойных тканях поперечное армирование достигается переплетением нитей одного из направлений отдельных слоев или всей ткани по толщине. Многослойные ткани изготавливают обычно из низкомолекулярных стекло-, органо- и углеродистых волокон. Применение, например, стеклотканей пространственного плетения приводит к возрастанию сдвиговой прочности композита в 2...2,5 раза, но из-за существенного искривления волокон уменьшается прочность при растяжении.

Повышение прочности при межслоевом сдвиге у полимерных композитов достигается также введением дискретных волокон в пространство между основными непрерывными волокнами. Оно осуществляется несколькими способами: чередованием слоев, состоящих из непрерывных волокон и дискретных волокон в виде матов и бумаги; пропиткой связующим, в которое предварительно введены дискретные волокна; вискеризацией основных армирующих волокон.

Вискеризация (нанесение дискретных волокон или нитевидных кристаллов на армирующие элементы) осуществляется путем осаждения дискретных волокон и нитевидных кристаллов на поверхность нитей, жгутов, лент, тканей из аэрозоля и суспензий. При оптимальном содержании нитевидных кристаллов в композитах удается повысить разрушающее напряжение при сдвиге в 2...3 раза, модуль упругости при сдвиге в 1,3...1,6 раза, разрушающее напряжение при сжатии в 1,5...2 раза и при растяжении в 1,5...3 раза. Вискеризованные композиты характеризуются также более высокой длительной прочностью при повышенных температуре и ударной вязкости по сравнению с обычными материалами.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЯХ И УЗЛАХ ИЗ ПКМ

Анализ методов соединения деталей из ПКМ в отечественных и зарубежных конструкциях летательных аппаратов показывает, что до 95% всех соединений приходится на долю механических точечных (заклепочных, болтовых и т. д.) [2]. Как было указано выше, для образования механического точечного соединения весьма ответственной операцией является получение отверстия, от качества которого во многом зависит прочность соединения в целом.

При получении отверстий в изделиях из ПКМ наиболее часто применяются технологические операции сверления и пробивки. Выбор способа образования отверстия определяется качеством окончательного отверстия и технологическими условиями его получения.

К отверстиям предъявляются следующие требования:

- оси отверстий должны быть строго перпендикулярны к поверхности детали;
- шероховатость поверхности отверстия R_z 20 мкм;
- отклонение формы отверстий от цилиндричности должно быть в пределах допуска на диаметр отверстия;
- на кромках отверстий не допускается наличие сколов, трещин, заусенцев, разрывов, материала на поверхности, а также огранки, расслоения, выкрашивания связующего материала, ворсистости;
- форма и номинальные размеры гнезд должны соответствовать геометрии головок потайных болтов и заклепок.

2.1. СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ И УЗЛАХ ИЗ ПКМ

Наиболее распространенной и в то же время наиболее трудоемкой операцией при обработке ПКМ является операция сверления. Трудоемкость сверлильных операций на некоторых изделиях достигает 70...80% от общей трудоемкости процесса механической обработки. Естественно, что в этих условиях неправильный выбор режущего инструмента и режимов резания приводит к значительным издержкам.

2.1.1. Основные особенности процесса резания ПКМ

Особые свойства изделий из ПКМ по сравнению с металлами обуславливают своеобразие процессов резания. Это затрудняет при-

менение стандартного металлорежущего инструмента для обработки деталей из ПКМ.

Одним из основных параметров, характеризующих процесс резания изделий из ПКМ, является абразивное воздействие наполнителя на режущий инструмент. Наличие в зоне резания твердых составляющих (стеклянные, борные или угольные волокна) приводит к абразивному износу инструмента. Упругость обрабатываемого материала, в особенности стеклотекстолита, способствует росту сил трения на поверхности инструмента, контактирующей с обрабатываемым материалом (главным образом на задней поверхности).

Теплопроводность ПКМ очень низкая (по сравнению с теплопроводностью стали она меньше в 500...600 раз). Это обуславливает слабый отвод теплоты со стружкой и в обрабатываемое изделие, поэтому при обработке ПКМ основная доля теплоты отводится через режущий инструмент. Исследования, проведенные рядом авторов [3,4], показывают, что при обработке стеклопластиков стальным инструментом ему передается 99,2...99,8% выделяемого тепла.

Повышение температуры полимерных композитов в области, прилегающей к зоне резания, меняет механические свойства этого слоя, причем тем интенсивнее, чем ниже теплоустойкость обрабатываемого материала. При определенной для каждого термореактивного ПКМ температуре начинается разложение связующих смол. Более высокие значения температур ухудшают качество обработанной поверхности, в результате чего образуются прижоги и дефектный слой, у которого полимерные связи частично или полностью разрушены. Интенсивное ухудшение качества обработанных поверхностей при резании термореактивных ПКМ начинается при температуре 523...573 К [3].

Таким образом, оптимальные режимы резания должны быть такими, чтобы температура в зоне резания не превышала допустимую для данного материала.

Как показали исследования [5], при обработке толстолистового стеклотекстолита длительность контакта инструмента с обрабатываемым материалом и величина износа инструмента действуют на интенсивность нарастания температуры в большей степени, чем режимы резания. В связи с этим инструментальный материал, предназначенный для работы в заданных условиях, должен отличаться повышенной теплоустойкостью и обеспечивать минимальный коэффициент трения при работе по рассматриваемым материалам.

Анализ явлений, сопутствующих процессам резания ПКМ, показывает, что простой перенос закономерностей процесса резания металлов на эти материалы недопустим. Необходимо учитывать природу ПКМ, их структуру и свойства.

При больших затуплениях инструмента из-за низкой адгезии связующего с армирующим волокном при увеличении сил резания образуются трещины между волокном и связующим, происходит выкрашивание связующего с обрабатываемой поверхности изделия, особенно в местах входа и выхода инструмента, что сказывается на качестве обработки. Сложная структура приводит к тому, что при повышенных износах инструмента происходит расслоение материала. Кроме того, при перерезании армирующих волокон, особенно при перекрестном армировании, наблюдается разломачивание перерезанных волокон, что ухудшает качество обработанной поверхности и заставляет иногда применять дополнительную доводочную операцию.

При обработке ПКМ процесс стружкообразования происходит иначе, чем у металлов, что объясняется разной их структурой. Анизотропия свойств ПКМ определяет иные процессы стружкообразования и при резании в разных направлениях. Высокие упругие свойства материала влияют на процесс его разрушения, который носит хрупкий характер. Получение в ряде случаев мелкодисперсной стружки вызывает необходимость ее удаления и защиты от ее воздействия.

2.1.2. Геометрические параметры сверл

Большое влияние на точность и качество обработанной поверхности, стойкость и прочность инструмента оказывают геометрические параметры режущего инструмента. Выбор их оптимальных величин имеет большое практическое значение.

Основными геометрическими параметрами режущей части сверла являются: угол при вершине 2ϕ ; задний угол α ; передний угол γ . Проведенные в работе [5] исследования позволили определить оптимальные геометрические параметры сверл из быстрорежущих сталей и твердых сплавов (табл. 6).

Рекомендуемые формы заточки режущей части сверла из быстрорежущих и твердосплавных сталей приведены в табл. 7 и 8.

Наибольшее влияние на качество обработанных отверстий и износ сверл оказывает угол при вершине сверла 2ϕ . С уменьше-

Геометрические параметры сверл

Обрабатываемый материал	Материал режущей части сверла	Геометрические параметры сверл, град.		
		2φ	γ	α
Стеклопластик	P9, P6M3, P6M5, P12, P9Ф5K5, P6M5K5, P18	100	15	20
	BK3, BK3M, BK4, BK6M, BK8	100	10	20
Боропластик	BK2, BK3M, BK6M, BK8	105	10	20
Углепластик	P6M3, P6M5, P9, P12,	90-100	10-15	15-20
	BK2, BK3M, BK6M, BK8	90-100	10	15-20

нием этого угла снижается осевая сила, увеличивается длина режущей кромки и, следовательно, удельное давление на единицу длины режущей кромки становится меньше, а это в свою очередь приводит к меньшему изнашиванию сверла. Однако чрезмерное уменьшение угла 2φ влияет на теплоотвод, что приводит к перегреву сверла и ухудшению качества отверстия. Лучшие результаты получаются при углах $2\varphi = 90...105^\circ$. При таком угле разбиения отверстий с 90%-ной вероятностью составляет всего 0,01...0,08 мм. Только развертывание и сверление по кондуктору позволяет более точно выполнять отверстия.

С увеличением заднего угла α происходит уменьшение сил трения по задней грани, что способствует меньшему выкрашиванию связующего и, как следствие, повышению чистоты кромок отверстия. Однако при значительном увеличении ($\alpha > 25^\circ$) угла происходит ухудшение чистоты отверстия.

С увеличением переднего угла γ шероховатость отверстия увеличивается. У стандартных сверл, как правило, передние углы большие, что и вызывает разлохмачивание кромок отверстий, особенно в момент выхода уголков сверла из отверстий.

2.1.3. Качество поверхности и точность обработки.

Режимы сверления

Неправильно выбранные геометрические параметры сверла и работа с большим его износом резко ухудшают качество повер-

Рекомендуемые формы заточки режущей части и конструкции сверл из быстрорежущих сталей

Форма режущей части	Эскиз заточки режущей части	Рекомендации по применению
Спиральная с нормальной заточкой		Стекло- и углепластик
Спиральная с двойной заточкой		
Спиральная с подрезающими режущими кромками		Стекло- и углепластик, глухие отверстия

Рекомендуемые формы заточки режущей части и конструкции сверл из твердых сплавов

Форма режущей части	Эскиз заточки режущей части	Рекомендации по применению
Спиральная с нормальной заточкой		Стекло-, угле- и борпластик
Спиральная с двойной заточкой		
Спиральная с подрезающими кромками		Стекло-, угле- и борпластик, глухие отверстия

ности отверстия. Под качеством поверхности подразумеваются не только шероховатость обработанной поверхности, но и состояние отверстий на входе и выходе сверла, а также точность обработанной поверхности. На входе сверла, особенно при сверлении в направлении, перпендикулярном армирующим волокнам, могут появляться разломачивания материала, и отверстия будут иметь вид, приведенный на рис. 3. На выходе сверла появляются расслоения или сколы. Это заставляет применять подкладки под просверливаемый материал. При применении сверл с рекомендованными выше геометрическими параметрами подобные дефекты на входе и выходе сверла отсутствуют.

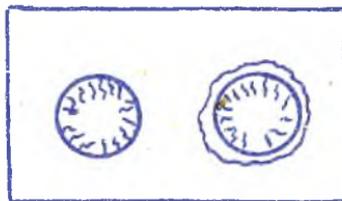


Рис. 3. Вид отверстий на входе сверла

Высокая упругость ПКМ приводит в процессе сверления к упругим сжимающим напряжениям по всей длине режущей части сверла. После изъятия сверла сжимающие напряжения исчезают, и материал, упруго деформируясь, восстанавливается, что приводит к уменьшению диаметра отверстия.

Упругое восстановление зависит не только от характеристик обрабатываемого материала, но и от геометрических параметров сверла, сил резания, режимов обработки. При применении сверл оптимальной геометрии оно может быть сведено к минимуму. По данным различных авторов [3,6], уменьшение диаметра отверстия за счет упругого восстановления составляет 0,01...0,05 мм. В связи с этим рекомендуется увеличивать диаметр сверла по сравнению с требуемым диаметром отверстия. С другой стороны, биение сверла и шпинделя сверлильного станка влияет на точность обработки в значительно большей степени, чем явление усадки отверстия.

Исследования, проведенные в работах [6,7], позволяют сделать вывод о том, что при выборе диаметра сверла нет необходимости учитывать упругое восстановление материала, так как во-первых, оно компенсируется разбиванием отверстия за счет биения сверла и шпинделя, во-вторых, допуск 11...12 квалитетов достаточно велик и диаметры просверленных отверстий не выйдут за его пределы.

На точность отверстия оказывают влияние технологические условия сверления – по разметке или по кондуктору. При сверлении по кондуктору несколько уменьшается биение, что приводит к

повышению точности сверления. Однако практически при любых технологических условиях сверление отверстий в ПКМ быстрорежущими и твердосплавными сверлами обеспечивает получение отверстий 11...12 квалитетов с шероховатостью $R_z = 20...40$ мкм.

При оптимальной геометрии сверла качество поверхности определяется шероховатостью, которая зависит от режимов резания и других факторов.

Проведенные в работах [6, 8, 9] исследования позволяют сделать вывод, что увеличение подачи и диаметра сверления приводит к ухудшению шероховатости поверхности.

На качество отверстия (особенно на входе и выходе режущего инструмента) оказывает влияние и износ сверла. Работы ряда исследователей [5,10] показывают, что при износе сверла по задней поверхности $h_3 = 0...0,15$ мм параметр шероховатости практически не изменяется и составляет $R_z = 20...40$ мкм.

Однако при $h_3 > 0,15$ мм наблюдается существенное разломачивание материала, особенно на входе сверла. На выходе сверла наблюдаются расслоения или сколы обрабатываемого материала.

По результатам экспериментальных исследований в работе [5] получены зависимости:

для стекло- и углепластиков

$$R_z = C_{R_z} + mV + X_{R_z} \cdot D + Y_{R_z} \cdot S;$$

для боропластиков

$$R_z = C_{R_z} \cdot D^{X_{R_z}} \cdot V^m / S^{Y_{R_z}}.$$

В этих формулах V – скорость резания, м/мин; D – диаметр сверла, мм; S – подача, мм/об.

Значения постоянных и показателей степеней сведены в табл. 9.

Таблица 9

Данные для расчета величины R_z

Обрабатываемый материал	C_{R_z}	m	X_{R_z}	Y_{R_z}
Стеклопластик	12,0	-0,39	1,74	50,5
Боропластик	9,8	0,16	0,29	0,1
Углепластик	11,6	-0,42	1,78	49,8

Поправочные коэффициенты на скорость резания при определении R_z для стекло- и углепластиков приведены в табл. 10.

Таблица 10

Поправочные коэффициенты

V, м/с	0,17	0,33	0,5	0,67	1,0	1,33
C_{RzV}	1,85	1,28	1,13	1,0	0,72	0,43

Поправочные коэффициенты на скорость резания при определении R_z для боропластиков приведены в табл. 11.

Таблица 11

Поправочные коэффициенты

V, м/с	0,083	0,17	0,25	0,42	0,67	1,0
C_{RzV}	0,84	0,94	1,0	1,09	1,17	1,25

Выбор режимов сверления, наличие или отсутствие смазывающе-охлаждающей жидкости зависит от стойкости сверл, требуемой производительности процесса и качества поверхности отверстия.

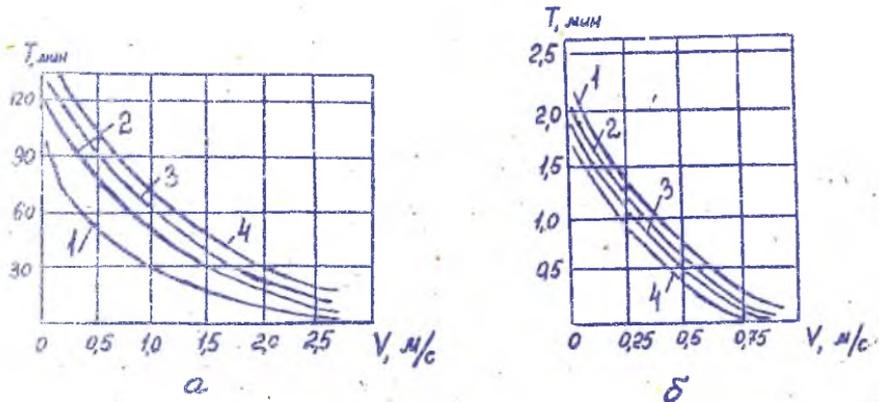


Рис. 4. Зависимость высоты неровностей R_z от режимов резания: а - при сверлении стеклопластика: 1 - $n = 750$ об/мин, $D = 5$ мм; 2 - $n = 400$ об/мин, $D = 5$ мм; 3 - $n = 750$ об/мин, $D = 20$ мм; 4 - $n = 400$ об/мин, $D = 20$ мм; б - при сверлении боропластика: 1 - $n = 400$ об/мин, $D = 5$ мм; 2 - $n = 530$ об/мин, $D = 5$ мм; 3 - $n = 400$ об/мин, $D = 20$ мм; 4 - $n = 530$ об/мин, $D = 20$ мм.

На графиках показаны зависимости стойкости сверла от скорости резания, подачи и диаметра сверла при сверлении стеклопластика (рис. 4, а) и боропластика (рис. 4, б). Увеличение скорости резания и подачи приводит к снижению стойкости,

причем наиболее сильное влияние на изменение стойкости оказывает скорость резания.

На основании экспериментальных и расчетных данных, приведенных в работе [5], были получены данные скоростей резания при сверлении стекло-, угле- и боропластика и сведены в табл. 12.

Более подробные таблицы, а также сведения о выборе норм расхода инструмента приведены в нормативных данных [11].

Таблица 12

Скорость резания при сверлении стекло-, угле- и боропластика, м/с

Подача, мм/об	Диаметр сверла, мм							
	4	6	8	10	12	14	16	20
Стекло- и углепластик, твердосплавные сверла								
0,10	-	-	0,87	0,890	0,900	0,91	0,920	0,94
0,20	0,43	0,45	0,46	0,465	0,470	0,48	0,485	0,49
0,30	0,29	0,30	0,31	0,320	0,325	0,33	0,330	0,34
0,40	0,22	0,23	0,24	0,240	0,250	0,25	0,260	0,27
Стекло- и углепластик, быстрорежущие сверла								
0,10	0,18	0,19	0,20	0,21	0,215	0,22	0,220	0,23
0,20	0,15	0,16	0,17	0,17	0,180	0,18	0,185	0,19
0,30	0,13	0,14	0,15	0,15	0,160	0,16	0,165	0,17
0,40	0,12	0,13	0,14	0,14	0,145	0,15	0,15	0,16
Боропластик, твердосплавные сверла								
0,05	0,09	0,12	0,14	0,17	0,20	0,23	0,25	0,30
0,10	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,23
0,20	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15	0,18
0,30	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15

2.1.4. Алмазное сверление ПКМ

Для интенсификации процесса сверления отверстий в ПКМ в последнее время все чаще используется алмазное сверление. Обладая самой высокой твердостью, алмаз имеет коэффициент трения по пластмассе значительно меньший, а коэффициент теплопроводности больший, чем у твердых сплавов.

Проведенные в большинстве работ исследования [12-14] показывают, что алмазное сверление повышает производительность труда, уменьшает расход режущего инструмента и улучшает качество обработанной поверхности.

Традиционное понятие стойкости инструмента как времени его работы от переточки до переточки для алмазных сверл неприемлемо, так как алмазное сверло (рис. 5) можно использо-

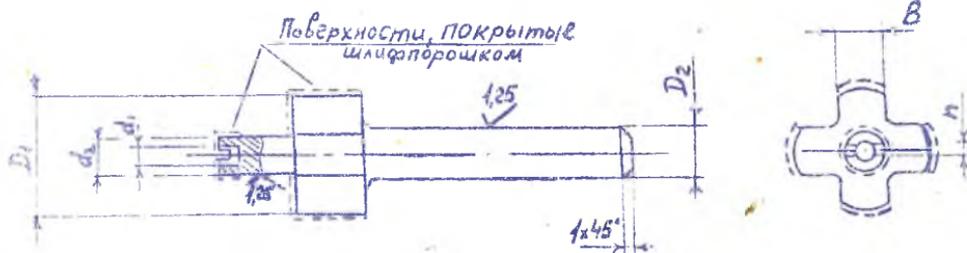


Рис. 5. Сверло-цековка с алмазным покрытием

вать до тех пор, пока размер отверстия, получаемого этим сверлом, не выйдет за нижнюю границу поля допуска. При уменьшении точности срок службы алмазного сверла должен увеличиваться.

Изнашивание алмазных сверл при обработке неметаллических материалов происходит за счет износа алмазных зерен, вырывания отдельных зерен из связки и истирания последней.

Вследствие того что алмазное сверление представляет собой абразивную обработку, следует ожидать и повышение качества поверхности отверстий. Повышение качества в свою очередь исключает зачастую дополнительные виды обработки, такие как развертывание и зенкерование.

Все дефекты, сопутствующие сверлению лезвийными сверлами, практически отсутствуют при алмазном сверлении.

Точность отверстий, просверленных одним сверлом, соответствует 8...9 квалитетам. Однако если взять сверло одного номинального диаметра из партии сверл, то разброс средних значений диаметров просверленных ими отверстий весьма велик. Причиной этого является, во-первых, большой диаметр алмазного слоя по сравнению с номинальным размером отверстия, во-вторых, значительное радиальное биение алмазного слоя. Уменьшить эти погрешности можно как за счет правильного проектирования самого алмазного сверла, так и за счет правильного базирования сверла.

Сверло следует базировать непосредственно в шпинделе, причем базовая поверхность должна выполняться с точностью по 5 квалитету. При таком базировании радиальное биение алмазного слоя не должно превышать 0,05...0,15 мм.

При оптимально спроектированном сверле и его правильном

базировании можно получить отверстия с точностью до 10 качества. Если необходимы более точные отверстия, то следует производить доводку сверла. Приемы доводки алмазных сверл освещены в литературе [15].

Проведенные экспериментальные исследования [5] показывают, что использование алмазных сверл позволяет повысить производительность по сравнению со спиральными сверлами в 1,5...4,5 раза. Однако несмотря на эти очевидные преимущества, процесс алмазного сверления в производственных условиях широкого применения пока не получил. Основными причинами этого являются отсутствие научно обоснованных рекомендаций по проектированию алмазных сверл и назначению режимов резания, а также возможность в ряде случаев применять твердосплавный инструмент. В то же время появление таких материалов, как боропластики и их композиции, делает практически невозможным сверление твердосплавными сверлами. Сдерживает процесс внедрения алмазного сверления и отсутствие специального оборудования.

2.1.5. Технология сверления отверстий в смешанных пакетах

Получение отверстий путем сверления в однородных из ПКМ и смешанных пакетах из ПКМ и металла – многооперационный и малопроизводительный процесс. В зависимости от сочетания материалов, толщин пакета, типа оборудования и инструмента отверстия выполняют либо в один переход (окончательный размер), либо в два перехода. Образование отверстий под болты или болт-заклепки производится сверлением с последующим развертыванием.

Для устранения попадания стружки между соединяемыми деталями перед сверлением необходимо обеспечить их плотное прилегание с помощью специальных прижимов, предусмотренных в сборочном приспособлении. Для натяжки обшивок могут быть применены амортизаторы с тендерами.

Для обеспечения жесткости и плотного сжатия пакета следует усанавливать средства временного крепления в виде пружинных фиксаторов, технологических болтов или заклепок. Пружинные фиксаторы рекомендуется применять в пакетах толщиной до 4,0 мм, технологические болты – в пакетах толщиной свыше 4,0 мм. В пакетах, не требующих промежуточной разборки, взамен средств временного крепления разрешается ставить контрольные заклепки

согласно чертежу на изделие. Фиксаторы, технологические болты или контрольные заклепки следует устанавливать с шагом не более 150 мм в зависимости от жесткости элементов конструкции.

В зависимости от принятой последовательности сборки узла сверление отверстий под средства временного крепления, а также их установку следует производить концевым (от одного края к другому) или центральным (от центра к периферии) способами.

При сверлении смешанного пакета со стороны металла на входе сверла в ПКМ происходит разрушение его заусенцами металла. На выходе под действием сил резания при неблагоприятных режимах происходит расслоение и скалывание ПКМ. Кроме того, при сверлении со стороны металла металлическая стружка выкрашивается и «разбивает» отверстие в ПКМ на глубину 0,2...0,8 мм. Получение указанных дефектов объясняется разницей осевых сил при сверлении металла и ПКМ. При одинаковых частоте вращения и подаче дрели осевая сила при сверлении алюминиевого сплава в 2...4 раза, а титанового сплава в 7...10 раз больше, чем при сверлении углепластика. В процессе сверления трудно уловить момент перехода из металла в ПКМ, а сила, прикладываемая к дрели, не меняется, что и порождает разрушение ПКМ. При выходе конусной части сверла, образованной главными режущими кромками, осевая сила при сверлении дрелью выше, чем при сверлении на станке.

Осевая сила при выходе конусной части сверла в процессе обработки на станке с постоянной подачей уменьшается от максимального значения до нуля почти по линейному закону. При работе дрелью постоянная сила, прикладываемая сверловщиком, приводит к увеличению подачи на выходе сверла из металла и перенапряжению нижних слоев ПКМ.

Чтобы исключить расслоение и сколы при выходе сверла из ПКМ, необходимо оптимизировать напряженно-деформированное состояние нижних слоев ПКМ.

Оптимизировать напряженно-деформированное состояние ПКМ можно различными способами. Можно снизить осевую силу по всей толщине обрабатываемого пакета использованием высокочастотного сверления или уменьшить осевую силу в зоне перехода из металла в ПКМ. Выход сверла из ПКМ можно осуществить с помощью демпфирующей насадки, через которую отсасывается пылевидная стружка. Металлическая стружка при этом получается тонкой, мягкой и практически не выкрашивает отверстие в ПКМ.

При соединении двух слоев ПКМ технология получения отверс-

тий в меньшей степени влияет на прочностные характеристики соединений, так как число дефектов в ПКМ из-за отсутствия металла существенно уменьшается.

При обработке пакета, состоящего из двух слоев ПКМ, высокое качество отверстий получается при сверлении алмазным инструментом, что объясняется многократным уменьшением силовых параметров резания по сравнению с силовыми параметрами при сверлении твердосплавным инструментом. Однако при использовании алмазного сверла в дрелях трудно точно просверлить отверстия. Эти недостатки сверления можно устранить с помощью комбинированного сверла.

Сверление на станках с механической подачей однородных пакетов с двухсторонним подходом следует производить со стороны более толстой детали, а смешанных пакетов – со стороны металлической детали. Сверление на станках с «ручной» подачей и пневмодрелями однородных и смешанных пакетов, имеющих двусторонний доступ, рекомендуется производить в два перехода: сначала со стороны более прочной и «толстой» детали, затем со стороны «тонкой» детали для однородных и со стороны композита для смешанных пакетов. Данное требование необходимо учесть в условиях резания ПКМ и металла (особенно титана и сталей), иначе при сверлении отверстий со стороны металла из-за невозможности сохранения равномерной подачи отверстие в детали из ПКМ получается типа «проткнутого» с рваными краями и значительной ворсистостью. Ворсистости и выкрашивания кромок можно избежать, произведя пакетную обработку сразу нескольких деталей с помощью специальной оснастки, обеспечивающей жесткий прижим материала по кромке отверстия. Аналогичный эффект дает применение специальных прокладок из фибры и фанеры, удаляемых после образования отверстий.

2.2. ПРОБИВКА ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ПКМ

Пробивка отверстий в деталях из ПКМ может осуществляться в обычных инструментальных одиночных и групповых штампах, используемых для пробивки отверстий в металлах. По сравнению со сверлением пробивка отверстий в инструментальных штампах обладает рядом преимуществ: отсутствие стружки и пыли (отход в виде кругляка); высокая производительность; отсутствие термического воздействия на материал по периметру разделения; отсутствие на

поверхности разделения в процессе пробивки крутящих моментов; возможность автоматизации процесса [2, 16].

Однако при пробивке возможно получение неудовлетворительно-го качества отверстий, что обусловлено появлением зоны дробления волокон, трещин в связующем материале, утяжки, скола и эллипсности.

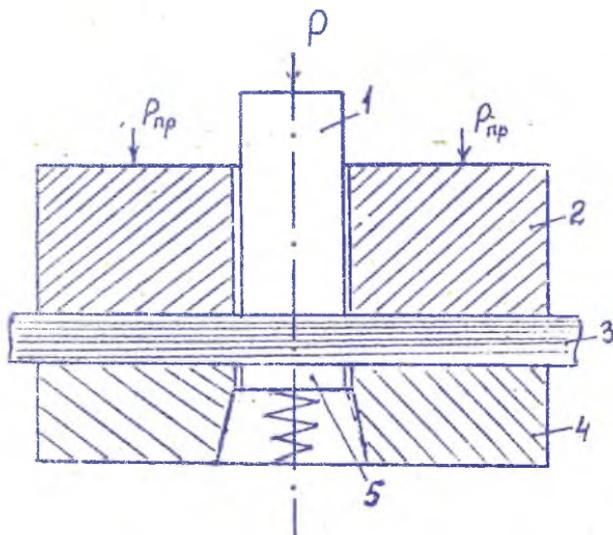


Рис. 6. Схема динамической пробивки в инструментальном штампе: 1 – пуансон; 2 – направляющая плита; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – матрица; 5 – подпор

Из существующих способов получения отверстий в деталях из ПКМ наилучшие результаты дает динамическая пробивка (со скоростью более 15 м/с) в инструментальном штампе при наличии прижима и подпора (рис. 6). Зона дробления волокон в этом случае находится в пределах зазора между пуансоном и матрицей. При этом точность отверстий соответствует 7...10 качеству; шероховатость поверхности разделения по периметру отверстия для деталей из перекрестно армированного углепластика типа КМУ R_z 40...20.

Однако при увеличении толщины композиционного материала (более 1,5 мм) и объемной доли армирующих волокон при динамической пробивке отверстий возникают по периметру отверстий утяжки на входе инструмента и скол по толщине обрабатываемого материала. Наличие же в композиционном материале высокомо-

дульных и высокотвердых волокон вызывает при пробивке значительный износ пуансона и матриц, что сопровождается снижением качества отверстий.

Попытка устранить недостатки динамической пробивки отверстий в инструментальном штампе путем совершенствования оснастки, например использование беззазорной пробивки, приводит к дополнительным отрицательным факторам. Значительно возрастает стоимость оснастки, резко снижается стойкость инструмента и, самое главное, возрастают силы трения между пробивным пуансоном и заготовкой, что приводит к появлению внутренних дефектов в получаемых деталях с отверстиями.

Для динамического способа пробивки отверстий необходимы дополнительные энергетические затраты, снижающие в первую очередь большие силы трения между инструментом и заготовкой и позволяющие создать оптимальное напряженно-деформированное состояние в зоне резания.

Таковыми источниками энергии не могут стать известные высокоэнергетические способы получения отверстий, например электрогидроэффект или гидрозрезание струей жидкости высокого давления. В этом случае огромная высвобождаемая энергия, во много раз большая работы разделения, не имеет строгой направленности, не может вызвать требуемое для качественного разделения напряженно-деформированное состояние в зоне реза и приводит к побочным нежелательным явлениям.

Устранение недостатков динамической пробивки можно достигнуть только за счет совместного использования вязкой среды под высоким давлением и инструмента в процессе разделения. В связи с этим разработан гидродинамический способ пробивки отверстий /16/.

Принципиальное различие гидродинамического способа пробивки отверстий от пробивки отверстий в инструментальном штампе заключается в наличии вязкой среды 4 в зазоре между пуансоном 2 и направляющей плитой 3 (рис. 7, а). Заготовка из ПКМ 5 располагается на матрице 7, в отверстие которой установлен также упругий элемент 6 с заданным характером изменения усилия подпора $P = f(\tau)$. Усилие пробивки P передается на пуансон 2 ударником 1 и имеет импульсный характер. Через направляющую 3 осуществляется предварительный прижим заготовки q .

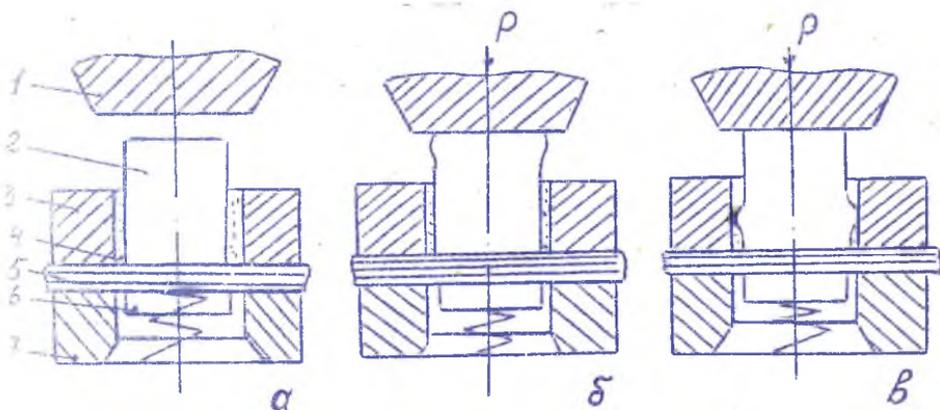


Рис. 7. Схема гидродинамической пробивки отверстия: 1 – ударник; 2 – пуансон; 3 – направляющая плита; 4 – вязкая среда; 5 – заготовка из ПКМ; 6 – упругий элемент; 7 – матрица

В момент контакта ударника 1 с пуансоном 2 в последнем возникают локальные упругие деформации (см. рис. 7, б), которые имеют волновой характер. Волна упругого сжатия распространяется вдоль оси пуансона в сторону заготовки и перекрывает зазор между пуансоном и направляющей, запирая вязкую среду в замкнутом объеме (см. рис. 7, в). Зазор рассчитывается исходя из физических свойств материала пуансона и вязкой среды таким образом, чтобы происходило наибольшее перекрытие. Происходит сжатие вязкой среды и резкое повышение давления, под действием которого вязкая среда затекает в образовавшийся зазор между направляющей и заготовкой и тем самым создает дополнительный кратковременный (импульсный) прижим заготовки P . В момент, когда упругая волна достигает торца пуансона, давление вязкой среды достигает максимального значения и происходит зарождение трещин (рис. 8, а). Далее под действием нагрузки, рассредоточенной по площади кольца, на поверхности заготовки произойдет осадка отхода, что обусловит сдвиг отделяемого материала относительно режущей кромки матрицы с разрушением армирующих волокон (рис. 8, б). Момент сдвига отделяемого материала относительно матрицы соответствует началу совместного движения поршня и пуансона (рис. 8, в). В процессе движения пуансона вязкая среда под действием поршня подается под высоким давлением в зону разделения, что

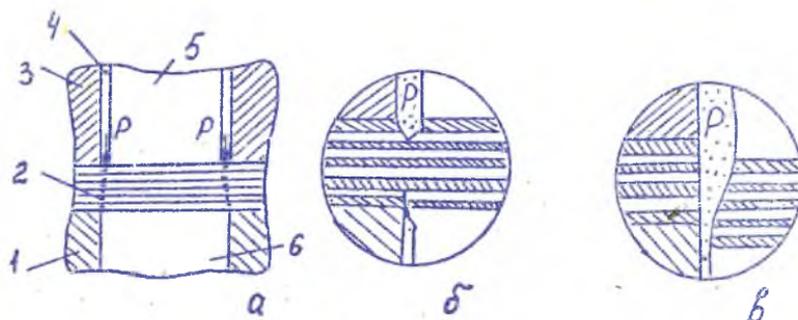


Рис. 8. Стадии процесса разделения заготовки из ПКМ: а – ударное воздействие вязкой среды на заготовку; б – осадка отхода с образованием разрушающей трещины; в – совместное движение вязкой среды и пуансона: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – прижим; 4 – вязкая среда; 5 – пуансон; 6 – подпор

предопределяет распространение разрушающей трещины со скоростью, большей скорости перемещения пуансона. Таким образом между заготовкой и пуансоном в процессе разделения образуется гарантированный зазор, что создает принудительный жидкостный или гидравлический режим трения.

Роль вязкой среды (смазки) при выполнении операций пробивки сводится в основном к уменьшению внешних вредных условий и коэффициента трения, а также к адсорбционному размягчению

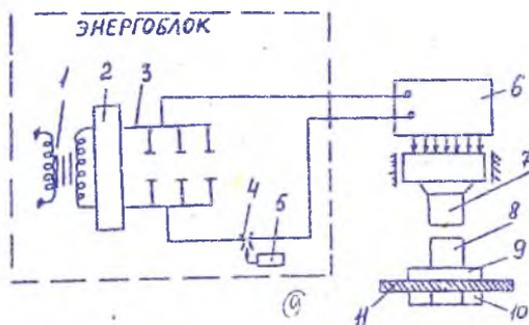


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки: 1 – трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – конденсаторная батарея; 4 – разрядник; 5 – регулятор запасаемой энергии; 6 – индикатор; 7 – ударник; 8 – пуансон; 9 – прижим; 10 – матрица, 11 – деталь

прилегающего к поверхности трения деформированного слоя материала, что уменьшает усилие обработки и повышает стойкость оснастки.

Для осуществления процесса гидравлической пробивки в СГАУ используется специальная установка, в которой для разгона пуансона используется энергия импульсных магнитных полей высокой напряженности. Принципиальная схема такой установки показана на рис. 9.

При включении установки в сеть конденсаторная батарея 3 с помощью зарядно-выпрямительного устройства, включающего в себя повышающий трансформатор 1, выпрямитель 2 и зарядное сопротивление, заряжается до заданного регулятором 5 значения запасаемой энергии напряжения. При достижении на конденсаторной батарее 3 соответствующего напряжения на поджигающий электрод трехэлектродного разрядника 4 от специальной схемы подается высоковольтный поджигающий импульс, инициирующий электрический пробой рабочего промежутка разрядника и коммутирующий разрядную цепь. Импульс тока, проходящий через индуктор 6, создает импульсное магнитное поле, которое разгоняет ударник 7. Кинетическая энергия ударника передается пуансону 8, который через направляющую 9 воздействует на заготовку. В результате происходит процесс пробивки отверстия в заготовке. Заданная скорость ударника в момент соударения его с пуансоном обеспечивается величиной уровня энергии заряда магнитно-импульсной установки.

Точность отверстий при пробивке их в штампах зависит от целого ряда факторов и в первую очередь от исполнительных размеров пуансона и матрицы. При пробивке отверстий в армированных пластинах исполнительные размеры пуансона определяются по формуле [2]

$$D_{\text{п}} = \left(D_{\text{н}} + \frac{\Delta}{2} + \delta_{\text{п}} \right) - \Delta_{\text{п}},$$

где $D_{\text{п}}$ – исполнительный размер пуансона; $D_{\text{н}}$ – номинальный размер отверстия; Δ – допуск отверстия; $\delta_{\text{п}}$ – усадка ПКМ, %; $\Delta_{\text{п}}$ – допуск на изготовление пуансона.

Значения $\delta_{\text{п}}$ при пробивке отверстий для некоторых материалов приведены в табл. 13 [2].

Влияние марки материала на усадку при пробивке отверстий

Материал	Усадки ПКМ (%) для толщин, мм		
	1-3	3-5	5 и более
Гетинакс	16...10	10...9	9...6
Текстолит	18...12	12...10	10...8
Стелотекстолит	20...15	15...10	10...7
Стекловолокнит	18...14	14...10	10...5
Углепластик	8...6	8...6	7...5

С целью повышения производительности и получения отверстий требуемого качества в толстолистовых заготовках из ПКМ разработано устройство для пробивки отверстий [17].

Устройство (рис. 10) состоит из матрицы 1 и направляющей 2, в которых выполнены соосные отверстия равного диаметра. В отверстия направляющей 2 установлен пуансон 3, имеющий кольцевую выемку диаметром, равным $(0,98...0,975)D$ и длиной не менее диаметра большой ступени.

Устройство работает следующим образом. Листовую заготовку 4 размещают на матрице 1 и фиксируют направляющей 2 с помощью упругой прижимной втулки 5. При этом усилие прижима должно составлять не более $0,7...0,9$ от предела прочности ПКМ в направлении его толщины.

Далее воздействуют на заготовку пуансоном 3, прилагая статическую нагрузку P и последовательно внедряя пуансон 3. По мере внедрения пуансона 3 имеет место заклинивание его большой ступени упругими остаточными напряжениями, возникающими в заготовке (см. рис.10, б). При дальнейшем движении пуансона 3 происходит усадка стенок отверстия и уменьшение его диаметра (см. рис. 10, в), а затем окончательная зачистка отверстия (см. рис. 10, г). Данное устройство позволяет получить отверстие по 7...8 качеству точности.

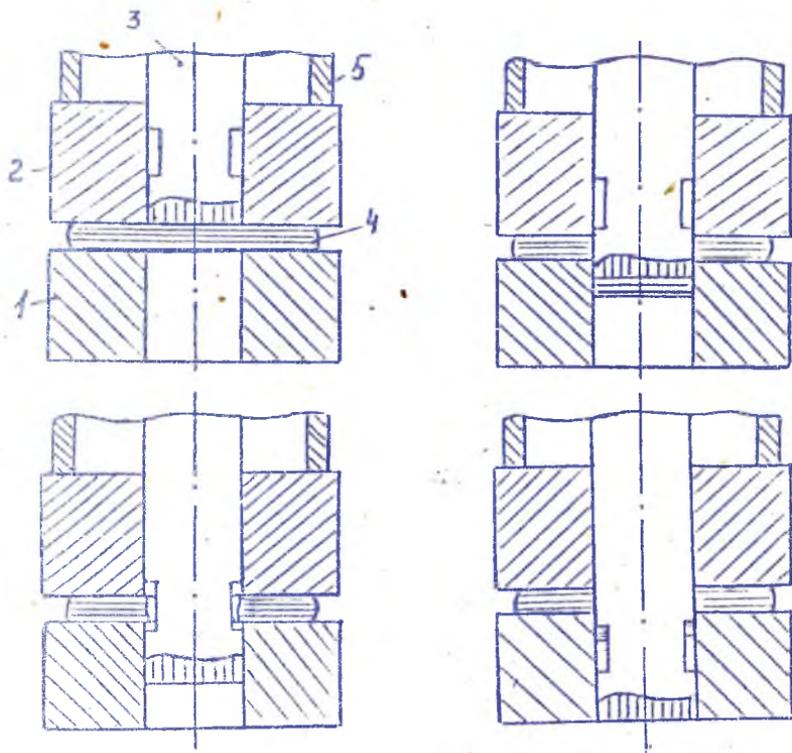


Рис. 10. Устройство для пробивки отверстий в толстолистовых заготовках из ПКМ:
 1 – матрица; 2 – направляющая; 3 – ступенчатый пуансон; 4 – листовая заготовка; 5 – прижимная втулка

2.3. ОБРАЗОВАНИЕ РЕЗЬБЫ И ГНЕЗД ПОД ПОТАЙНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ. РАЗВЕРТЫВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ

Получение резьбы на изделиях из ПКМ может быть обеспечено различными методами: нарезанием, формованием, прессованием.

Процесс нарезания резьбы метчиком в деталях из ПКМ связан с определенными трудностями, обусловленными [2]:

- наличием у стеклопластика значительной податливости, что приводит к защемлению метчика;
- неоднородностью и слоистостью структуры ПКМ, не обеспечивающими ровной и гладкой резьбовой поверхности;

– высокой истирающей способностью стеклопластиков, приводящей к быстрому изнашиванию метчиков.

Геометрические параметры метчиков для нарезания резьбы в деталях из ПКМ значительно отличаются от геометрических параметров инструмента для нарезания резьбы на металлических деталях. Так, передний угол «машинных» метчиков для обычной метрической резьбы делается отрицательным – от -5° до -10° . Достижимая точность резьб не выше 3-го класса.

При зенковании применяют те же оборудование и ручной механизированный инструмент, что и при сверлении [2].

Зенкование гнезд под механические течечные соединения с потайной головкой обычно производят комбинированным инструментом – сверлом-зенковкой (рис.11), с одновременным образованием отверстий и гнезд.

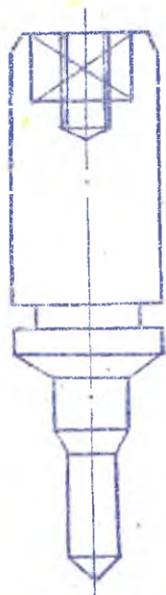


Рис. 11. Сверло-зенковка

Для зенковки гнезд под головки заклепок и болтов с углом конуса 120° применяют четырех- и шестизубные зенковки. Угол при вершине зенковки должен быть равным углу конуса потайной головки заклепки или болта $2\phi = 120^\circ$; задний угол $\alpha = 15...20^\circ$, а передний угол $\gamma = 0...10^\circ$.

Зенкование гнезд под головки потайных заклепок и болтов с углом конуса 90° производят шестизубными зенковками с углами $2\phi = 90^\circ$, $\alpha = 15...20^\circ$, $\gamma = 0...10^\circ$. Увеличение количества зубьев у зенковки повышает качество поверхности обрабатываемых гнезд и увеличивает стойкость инструмента. Режущие кромки зенковок должны быть остро заточены. Об износе зенковок свидетельствует появление ворсинок и граненой поверхности по периметру лунок. Допустимый износ по задней поверхности составляет $h_{\text{изн}} \leq 0,1$ мм.

Для обеспечения точности выполнения зенкованных гнезд необходимо применять зенковальные насадки с упором-ограничителем глубины зенкования, закрепляемые в патроне дрели или сверлильного станка (рис. 12). Зенкование пневмодрелями ведется с исполь-

зованием направляющих штифтов. Диаметры направляющих штифтов к зенковкам выбирают в зависимости от диаметра заклепки по табл. 14.

Перед выполнением операции зенкования необходимо произвести регулирование упора ограничителя зенковальной насадки на заданный размер.

Упор-ограничитель зенковальной насадки настраивается на калибр-заклепку на величину, указанную в табл. 14.

Минимальная толщина слоистых армированных пластинок, допускающая зенкование в них гнезд, зависит от размеров заклепок и болтов и не должна быть меньше, чем высота потайной головки заклепки или болта плюс 0,3...0,8 мм в зависимости от диаметра заклепки или болта.

Штампование потайных гнезд для крепежных элементов в терморезистивных стеклопластиках и углепластиках не допускается из-за невозможности осуществления пластических деформаций ПКМ как в холодном, так и в нагретом состоянии.

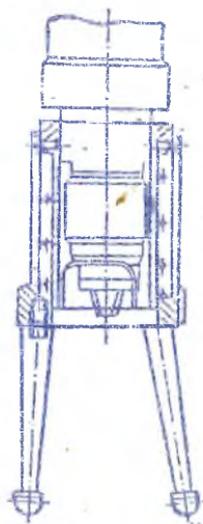


Рис. 12. Зенковальная насадка с упором-ограничителем глубины зенкования

Таблица 14

Размеры и допуски направляющих штифтов

Диаметр направляющего штифта, мм	Диаметр заклепки, мм								
	2,0	2,6	3,0	3,5	4	5	6	7	8
Номинальный	2,1	2,7	3,1	3,6	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1
Допустимое отклонение		-0,007				-0,011			-0,15
		-0,032				-0,044			-0,055

В смешанных пакетах при наличии металлической обшивки толщиной до 1,0 мм гнезда под головки потайных заклепок выполняют штампованием в металлической обшивке и зенкованием в детали из ПКМ.

Для получения отверстий с лунками в толстолистовых деталях из слоисто-волоконных композиционных материалов используется способ, заключающийся во внедрении втулочного пуансона (рис. 13, [18]). В процессе его внедрения в обрабатываемый материал осуществляется перерезание слоев композиции.

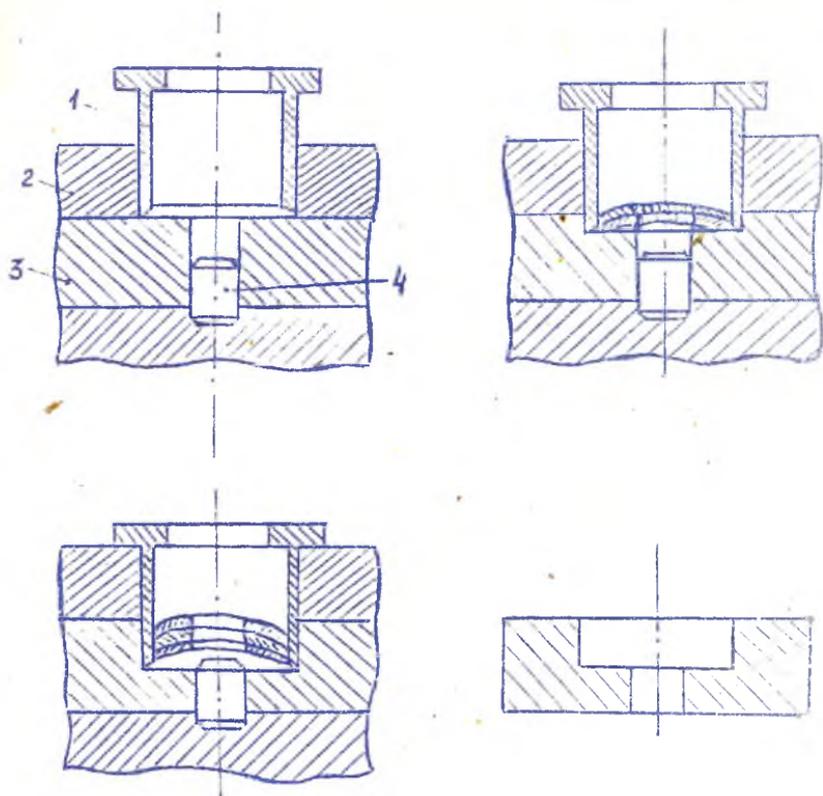


Рис. 13. Способ получения отверстий с лунками в толстолистовых деталях из слоисто-волоконистых композиционных материалов: 1 – втулочный пуансон, 2 – направляющая плита, 3 – толстолистовая заготовка, 4 – штифт

Наличие конической полости в пуансоне предопределяет появление радиальной составляющей усилия деформирования на базовую поверхность перерезанного слоя, величина которой возрастает с увеличением глубины внедрения пуансона в заготовку, что вызывает отрыв перерезанного слоя по всей контактирующей поверхности от остальных слоев с прогибом в коническую полость пуансона.

Данный способ образования отверстий с лунками обладает высокой производительностью, позволяет осуществлять групповую штамповку и применять автоматизацию. Наличие высокого качества поверхности разделения устраняет доводочные операции, что приводит к снижению трудоемкости изготовления деталей и улучшает условия труда.

Развертывание применяется для обеспечения требуемых точности и качества при образовании отверстий под болтовые соединения. Развертывание отверстий в ПКМ может осуществляться машинными и ручными развертками. При этом могут быть использованы машинные развертки стандартной конструкции, оснащенные твердосплавными наплавками. Допускается также применение ручных быстрорежущих разверток стандартной конструкции, однако следует учитывать их низкую стойкость. Рабочие части разверток рекомендуется оснащать твердыми сплавами марок ВКЗМ и ВК2. Допускается применение сплава марки ВК8 [2]. Рекомендуются следующие геометрические параметры рабочей части разверток: передний угол $\gamma = 0^\circ$; задний угол $\alpha = 8...10^\circ$; угол при вершине $2\phi = 15^\circ$.

Критерием затупления является износ по задней поверхности, равный 0,08...0,1 мм. В целях компенсации «усадки» отверстий диаметр калибрующей части следует увеличивать на 0,01...0,02 мм по сравнению с развертками для стали.

При машинном развертывании отверстий в ПКМ рекомендуются следующие режимы резания:

скорость резания V , м/мин	20...40
подача S , мм/об	0,1...0,6
глубина резания t , мм	0,2...0,3

При увеличении подачи несколько увеличивается «усадка» отверстий. Поэтому изменением подачи можно регулировать размеры отверстий в пределах 10...20 мкм. Развертывание в малыми подачами не рекомендуется, так как при этом снижается точность отверстий, но увеличивается овальность и конусность.

На точность отверстий влияют: сочетание материалов в пакете – для однородных пакетов (композит + композит) точность несколько выше, чем для смешанных пакетов (композит + металл) – и способ образования отверстий (рис. 12).

Использование нескольких сверл и разверток для образования отверстий под болтовые соединения нецелесообразно, так как точность таких отверстий практически соответствует точности отверстий, полученных одним сверлом и одной разверткой, и 7...9 качеству точности.

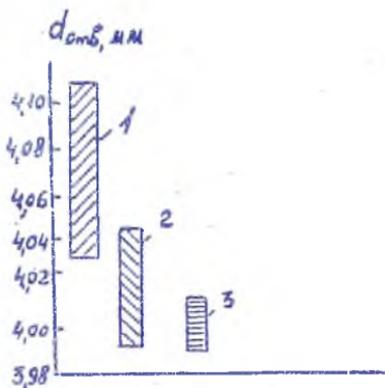


Рис. 14. Влияние способов образования отверстий на точность (углепластик КМУ-IV): 1 – сверление; 2 – пробивка; 3 – развертывание

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Портной К. П., Салибеков С. Е., Светлов И. Л., Чубаров В. М. Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 255с.
2. Воробей В. В., Сироткин О. С. Соединение конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1985. 168с.
3. Штучный Б. П. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение, 1974. 144с.
4. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение, 1974. 192 с.
5. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных полимерных композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1987. 176 с.
6. Буловский П. И., Петрова Н. А. Механическая обработка стеклопластиков. Л.: Машиностроение, 1969. 152 с.
7. Тихомиров Р. А., Николаев В. И. Механическая обработка пластмасс. Л.: Машиностроение, 1975. 206 с.
8. Ерохин А. А. Обработка стеклопластиков резанием. // Высокопроизводительное резание в машиностроении. М.: Наука, 1966. С. 48-54.
9. Ершов Е. М., Мордвин А. П. Изготовление резьб на деталях из стеклопластиков. Л.: Машиностроение, 1969. 128 с.
10. Крысин В. Н., Крысин М. В. Технические процессы формирования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
11. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода резцов, сверл и фрез при обработке неметаллических конструкционных материалов (пластмасс). М.: НИИМаш, 1962. 144с
12. Никитин А. П. Обрабатываемость резанием стеклопластиков. Пластические массы, 1973. №8. С. 28-31.
13. Обработка стеклопластиков алмазным инструментом/ И. М. Курис, А. Н. Трёмбовецкий, В. А. Сидоренко и др. // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. Киев: Наук. думка, 1977. С. 181-183.
14. Сверление отверстий в стеклопластике алмазным инструментом/ В. И. Захаров, Л. К. Лапшина, А. А. Степанов и др. // Синтетические алмазы, 1972. Вып. 3. С. 59-61.
15. Балыков А. В., Цесарский А. А., Алмазное сверление деталей из

труднообрабатываемых неметаллических материалов. М.: Машиностроение, 1980. 65с.

16. К о з и й С. И., Ж е л т о в И. Н. Разделительные операции при обработке волокнистых композиционных материалов / Куйбышев. авиац. ин-т, Куйбышев, 1986. 67 с.

17. А. с. №1265007. СССР МКИ В21Д 28/00. Устройство для пробивки отверстий/ С.И. Козий и др. - №3893738/25-27. Заявл. 29.03.85; Опубл. 23.10.86. Бюлл. №39.

18. ОСТ 92-4770-87. Детали из композитов, армированных волокнами. Типовые технологические процессы получения механических точечных соединений с применением импульсного привода. М., 1988. 138 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Конструкционные свойства композиционных материалов	4
1.1. Армирующие элементы	4
1.2. Связующие материалы	7
1.2.1. Термореактивные полимерные связующие	7
1.2.2. Термопластичные полимерные связующие	9
1.3. Структурные особенности и механические свойства ПКМ	10
2. Получение отверстий в листовых деталях и узлах из ПКМ ...	15
2.1. Сверление отверстий в деталях и узлах из ПКМ	15
2.1.1. Основные особенности процесса резания ПКМ	15
2.1.2. Геометрические параметры сверл	17
2.1.3. Качество поверхности и точность обработки. Режим сверления	18
2.1.4. Алмазное сверление ПКМ	24
2.1.5. Технология сверления отверстий в смешанных пакетах	26
2.2. Пробивка отверстий в деталях из ПКМ	28
2.3. Образование резьбы и гнезд под потайные соединения. Развертывание отверстий	35
Библиографический список	40