

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.3.049.75 : 678.067.029.46 : 621.396

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ОСНОВАНИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

С. В. Ванцов, А. М. Медведев, Зве Маунг-Маунг, О. В. Хомутская

Анализ современных технологий производства электронных средств показал, что обеспечение надежности является наиболее ответственным этапом процесса изготовления печатных плат [1, 2].

Надежность процесса сверления зависит от:

- материала диэлектрического основания и фольги;
- инструмента, в основном сверл;
- станочного оборудования;
- режимов сверления;
- человеческого фактора.

Рассмотрим эти факторы подробнее.

### *Материалы*

Проблемы обеспечения процесса сверления монтажных отверстий в печатных платах обусловлены значительными различиями в твердости компонентов материалов основания, а именно:

- стеклянные армирующие волокна диэлектрического основания – средняя твердость по Бринеллю – 500 НВ;
- медная фольга – 35 НВ.

Твердость полимерного связующего имеет некоторое промежуточное значение (ближе к 50 НВ) и сильно зависит от состояния диэлектрического основания, в первую очередь от температуры. В любом случае сверло при сверлении проходит в целом случайным образом расположенные участки материалов, твердость которых различается на порядок и более. Это означает, что процесс износа режущих кромок сверла носит существенно случайный характер.

При этом следует отметить, что степень износа инструмента, т.е. его срок службы, зависит от твердости обрабатываемого материала. Уменьшить степень износа позволяет оптимальный выбор углов заточки режущих кромок. В случае сверления печатных плат сложно выбрать наиболее оптимальный вариант заточки, поскольку сверление происходит в композиционном материале и изменение твердости, как отмечалось выше, носит случайный характер [3].

Толщина платы может колебаться от 0,25 до 8 мм, при этом наиболее распространенными являются платы с толщиной около 1,6 мм [4].

На практике для увеличения производительности процесса используют, как правило, сверление стопки заготовок. За счет этого увеличивается глубина сверления. В случае изготовления отверстий малого диаметра (менее 1 мм) увеличение глубины сверления с учетом разнородности твердости участков сверления в композиционных материалах может привести к уходу сверла от конструктивного центра отверстия. Одновременно происходит усиленный нагрев в зоне резания, что может вызвать расплавление связующего. Процесс нарастания температуры в зоне резания усугубляется плохой теплопроводностью обрабатываемого материала, т.е. сверло не охлаждается в процессе сверления.

**Армирование** диэлектрического основания осуществляется в основном стеклотканью на основе пряжи из алюмоборосиликатного стекла. Для улучшения размерной устойчивости основания плат из композиционного диэлектрика в нем увеличивают содержание стекловолокна, в частности увеличивают диаметр волокон. Это означает, что в композиционном материале увеличивается количество участков с повышенной твердостью. Как отмечалось выше, это приводит, с одной стороны, к повышению вероятности ухода сверла, а с другой, что представляется более важным для процессов получения монтажных отверстий, – увеличивается температура в зоне резания.

Одновременно с этим увеличение твердости за счет стекла приводит к повышенному износу режущих кромок и, естественно, сокращению ресурса сверла.

В качестве связующего в диэлектрическом основании наиболее часто в настоящее время используется диановая эпоксидная смола, галогенизированные присадки (чаще, бромом) для придания ей огнестойкости. Обычно ее обозначают как FR-4, что означает *Flame retardants* – противостоящий огню (не горючий). Однако общие соображения по поводу процесса сверления одинаковы и для других видов связующего. Определяющей характеристикой связующего при сверлении является температура стеклования ( $T_g$ ), т.е. температура, при которой полностью отвержденная смола начинает размягчаться. Температура стеклования для стеклоэпоксидных композиций обычно составляет от 130 до 200 °С.

Наличие медной фольги толщиной 17 или 35 мкм на диэлектрическом основании одно- и двухсторонних печатных платах не оказывает существенного влияния на износ режущих кромок сверла и, соответственно, на его нагрев.

Вышеприведенные соображения позволяют сделать следующие выводы о влиянии свойств материалов печатных плат на износ и нагревание сверла в процессе сверления:

1) ускоренному износу режущих кромок сверла и повышению температуры в зоне резания способствует:

- увеличение доли стекловолокна в диэлектрическом основании;
- использование связующего с повышенной температурой стеклования;

2) наличие медной фольги на поверхности диэлектрика не оказывает существенного влияния на износ и температуру сверла;

3) процесс износа режущих кромок носит случайный характер;

4) наличие случайного характера износа сверла не оказывает влияние на нагревание сверла в ходе сверления одного отверстия в силу инерционности теплопередачи в теле сверла и отсутствия теплоотдачи.

### **Инструмент**

Основным инструментом для получения монтажных отверстий в печатных платах являются твердосплавные сверла. Они изготавливаются из карбида вольфрама с присадками карбида кобальта (ВК6, ВК8 по ГОСТ 3882). Этот материал устойчив к износу, мало меняет свои характеристики при нагревании в диапазоне температур до 500–600 °С и относительно недорог, что делает его идеальным для сверления композиционных материалов плат, содержащих стекло. Вместе с тем он относительно хрупок, что может приводить к поломке малоразмерного сверла во время сверления монтажного отверстия, в частности за счет ухода сверла от оси отверстия и биения.

На рис. 1 приведены типовые геометрические характеристики твердосплавного сверла для получения отверстий в печатных платах.

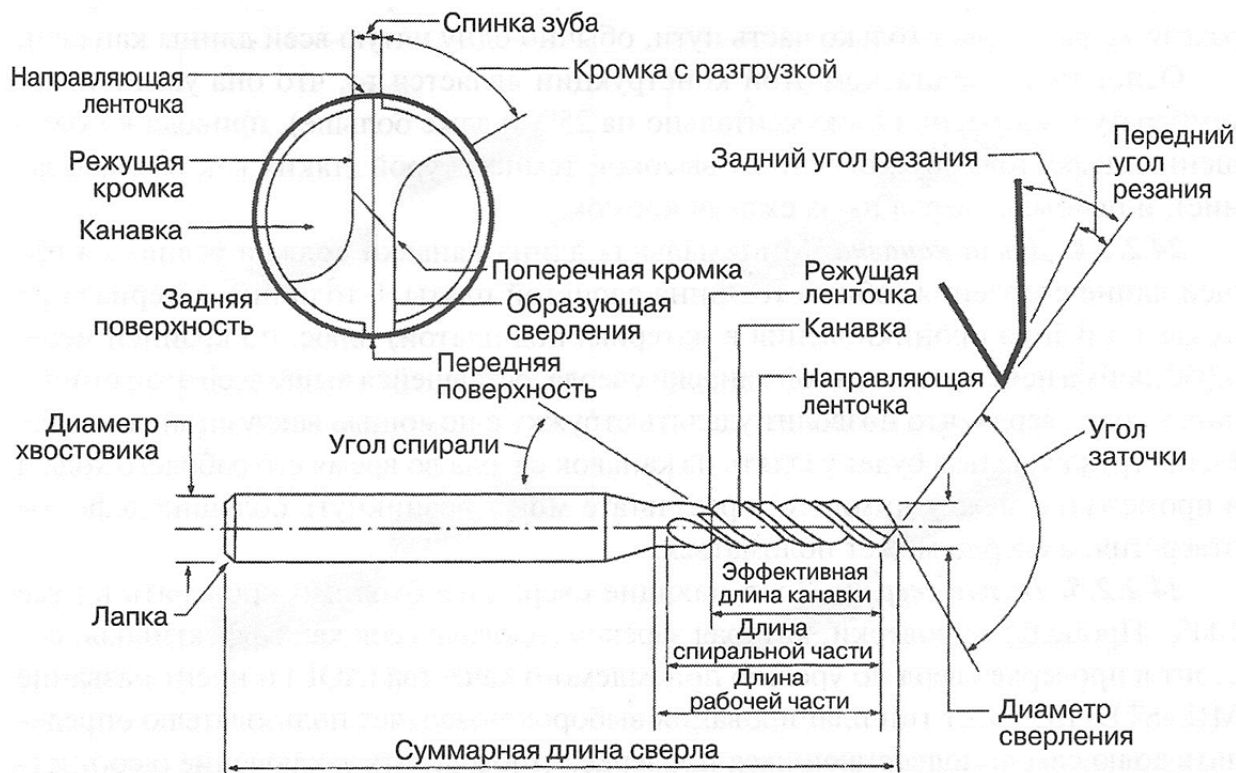


Рис. 1. Геометрические характеристики сверла

Его конфигурация очень сильно сказывается на состоянии режущих кромок во время сверления. Так, ширина режущей кромки увеличивается из-за износа в ходе сверления. Чем шире режущая кромка, тем больше сила трения во время резания. Величина силы трения определяет величину и скорость нарастания температуры в зоне сверления, за счет которой, естественно, в целом увеличивается температура сверла. Неверный выбор геометрии спиральных канавок, зависящей от структуры композиционного материала, может приводить к налипанию стружки в спиральном канале. Это приводит к дополнительной теплоизоляции тела сверла и, как следствие, дополнительному увеличению температуры в зоне резания.

Скорость нарастания температуры сверла приводит к быстрому достижению температуры стеклования, за счет этого возникает размазывание и сколы наполнителя. В свою очередь размазывание смолы приводит к ее увлечению за сверлом на выходе из отверстия. Это приводит к образованию буртика, подъему и отслоению фольги на контактной площадке печатной платы (рис. 2, 3).



Рис. 2. Буртик и подъем фольги на выходе из отверстия (съемка сделана в косом свете)

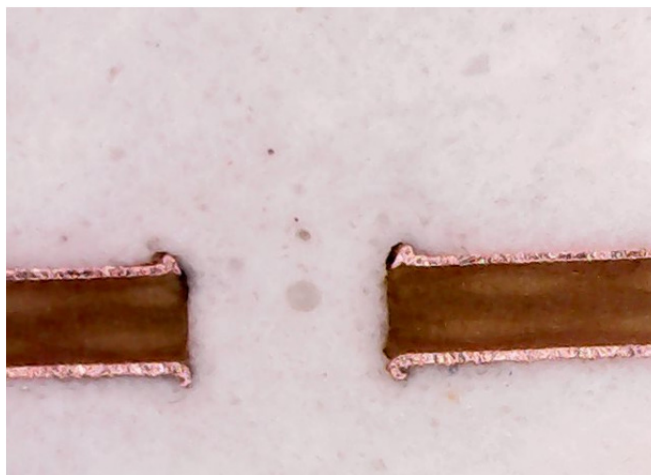


Рис. 3. Микрошлиф буртика, подъема и отслоения фольги на входе и выходе сверла

В ряде случаев этот дефект может приводить к разрыву гарантированного пояска, что можно рассматривать как отказ процесса сверления, приводящий к возникновению неисправимого брака платы.

Таким образом, возникновение таких дефектов является сигналом того, что сверло выработало свой ресурс, который в среднем составляет около 1000 отверстий.

Вместе с тем поставщики сверл для получения монтажных отверстий могут только приблизительно, в среднем, указать их ресурс. Эта «приблизительность» сказывается при использовании стеклотекстолитов, для которых основные параметры механической обработки приводятся поставщиками также приблизительно и расплывчато.

В соответствии с ГОСТ 25751 «Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий» ресурсом режущего инструмента является наработка режущего инструмента от начала резания новым инструментом до достижения им предельного состояния.

Понятие предельного состояния является общим и может быть временным, массовым, пусковым, поверхностным, объемным и штучным. Ресурс сверл для печатных плат назначается в штуках, т.е. количестве отверстий, которые можно просверлить новым сверлом.

Понятие предельного состояния в соответствии с ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» определяется как состояние средства, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Для режущего инструмента предельное состояние определяется величиной износа режущего клина инструмента [5].

Определение величины износа режущих кромок сверл для печатных плат является технически сложным и экономически нецелесообразным.

Поэтому предельным состоянием сверла будем считать появление отказов в процессе сверления.

На плате, которую начали сверлить новым сверлом, количество просверленных отверстий может быть меньше назначенного ресурса сверла. Естественным образом возникает желание продолжить использование этого сверла на следующей плате. Однако при этом нет гарантии того, что ресурс сверла будет достигнут, а все отверстия будут выполнены. Также нет гарантии, что не начнут появляться дефекты сверления раньше чем будет достигнут назначенный поставщиком ресурс. Последнее может возникнуть при неправильном выборе режимов сверления.

Паллиативом увеличения ресурса сверла из соображений экономии является повторная заточка сверла. Стоимость повторной заточки инструмента может составлять 15 % от стоимости нового сверла. Число повторных заточек сверла варьируется от 1 до 10 и даже более и обычно зависит от его диаметра [1]. Однако повторно заточенное сверло уже не сможет функционировать как новое, поскольку обработке подвергается только его вершина, тогда как оставшаяся часть, включая режущую кромку, уже не обновляется. Состояние этой кромки имеет большое значение, поскольку она является той частью сверла, которая обрабатывает стенку отверстия.

При перезаточке формируется в первую очередь угол при вершине сверла (2φ). Чем меньше угол, тем меньше нагрузка на единицу длины режущей кромки, уменьшается толщина срезаемой стружки и теплота от режущей кромки отводится лучше. Однако при этом существенно возрастает усилие резания и, соответственно, увеличивается количество образуемого из-за трения тепла. Поэтому следует искать разумный компромисс между возрастанием температуры в зоне резания и величиной теплоотвода.

При сверлении монтажных отверстий в стеклотекстолите твердосплавными сверлами угол при вершине должен составлять 70–90 градусов [6]. Однако эта величина является существенно средней и значительно варьируется в зависимости от материала основания платы.

Из изложенного можно сделать следующие выводы, касающиеся зависимости надежности процесса сверления от выбранного инструмента:

- 1) геометрические характеристики сверла оказывают существенное влияние на величину его ресурса;
- 2) увеличение ширины режущей кромки за счет износа приводит к увеличению температуры в зоне резания при прочих равных условиях;
- 3) увеличение температуры в зоне резания приводит к увеличению скорости износа режущих кромок;
- 4) зависимость *износ–температура* сверла носит нелинейный и случайный характер;
- 5) величина назначенного поставщиком сверла ресурса является величиной сугубо приближительной и ориентированной на износ режущих кромок, который является сложно определяемым;
- 6) практически значимым событием в определении ресурса сверла является появление отказов процесса сверления.

### **Режимы сверления**

Режимы сверления имеют наибольшее влияние на надежность процесса сверления, поскольку, с одной стороны, могут изменяться в достаточно большом диапазоне величин, а с другой – предоставляют технологу достаточную свободу в выборе этих величин.

Отметим также, что именно режимы сверления обеспечивают наибольшую управляемость надежностью процесса сверления. Если характеристики материалов платы и свойства применяемых сверл являются в сущности заданными и определяются поставщиками, то режимы обработки определяет конкретный технолог на конкретном производстве. Определенные технологом режимы должны обеспечивать наибольшую надежность процесса при условии минимальной стоимости.

Естественно, что поставщик указывает стойкость сверл для некоторых осредненных режимов обработки и весьма условных свойств материалов. Пример таких данных показан в табл. 1.

Таблица 1

Пример указания поставщиком сверл типовых режимов сверления [5]

Параметры для FR4 2–6 слоя						Тип сверла: НАМ 382			
Диаметр [мм]	Длина режущей части [мм]	Толщина стека [мм]	Девиация [мкм]	Обороты шпинделя [об./мин × 1000]	Скорость подачи [мкм/об.]	Скорость подачи [м/мин.]	Обратный ход [м/мин.]	Скорость резания [м/мин.]	Ресурс стойкости инструмента [сверлений]
0,60	7,00	5,70	50	95	50	4,75	12	180	4000
0,70	10,50	8,20	70	82	55	4,50	14	180	4000
0,80	10,50	8,20	70	72	60	4,30	15	180	5000
0,90	10,50	8,20	70	64	70	4,50	15	180	5000
1,00	10,50	8,20	65	57	80	4,60	15	180	5000
1,10	10,50	8,20		52	90	4,70	15	180	4000
1,20	10,50	8,20		48	100	4,80	15	180	4000
1,30	10,50	8,20		44	100	4,40	15	180	4000
1,40	10,50	8,20		41	100	4,10	15	180	4000
1,50	10,50	8,20		38	100	3,80	15	180	4000

Приводимые в таблице поставщиком сведения о ресурсе сверла не указывают ни состав FR-4, ни глубину сверления. Однако от состава материала зависит температура стеклования и, соответственно, критерий наступления отказа процесса сверления. Отсутствие сведений о суммарной глубине сверления не позволяет оценивать величину температуры в зоне резания: чем больше глубина, тем больше температура. Вместе с тем величина температуры также является критерием отказа процесса сверления.

Поставщик сверл, указывая ресурс сверла, ориентируется на предельное состояние режущей кромки сверла. Однако, как указывалось ранее, для режущего инструмента предельное состояние определяется величиной износа режущего клина инструмента [2].

Механизм износа определяется диффузионными, адгезивными и абразивными явлениями.

Для случая сверления печатных плат, т.е. в основном сверления композитных материалов, отсутствует диффузионный и адгезивный износ. Это объясняется тем, что температура в зоне резания существенно ниже температуры теплостойкости твердых сплавов и поэтому нельзя говорить о взаимопроникновении материалов тела изделия и материала режущего инструмента. Адгезивный износ отсутствует в силу того, что твердость материала сверла существенно выше твердости наполнителя композитного материала. Твердость стекловолокна соизмерима с твердостью твердого сплава, однако для проявления адгезионных свойств стекла нужна температура существенно более высокая, чем та, которая развивается при сверлении монтажных отверстий.

Поэтому основным механизмом износа режущей кромки сверла является абразивный износ, который в первую очередь определяется объемной долей стекла в композитном материале.

Поставщик сверл, указывая на ресурс сверла, традиционно и в соответствии с общепринятыми нормами ориентируется на износ режущих кромок.

Однако для технологических процессов сверления печатных плат ресурс определяется не возможностью получения отверстия, а отсутствием дефектов в получаемых отверстиях.

Основным и в первую очередь появляющимся дефектом при сверлении отверстий является наволакивание наполнителя на стенки отверстия и увлечение его за пределы заданных геометрических размеров с образованием буртиков на входе и выходе сверла.

Таким образом, ресурс сверла при получении монтажных отверстий в печатных платах должен определяться отсутствием дефектов отверстия.

Появление таких дефектов определяется в первую очередь температурой в зоне резания, которая зависит от режимов резания: глубины резания, скорости подачи и скорости резания.

При сверлении отверстий глубина резания является величиной постоянной, равной половине диаметра сверла.

Скорость подачи определяет в первую очередь силу трения задней поверхности режущей кромки по телу композитного материала.

Скорость резания определяет время действия силы трения во время сверления, т.е. время нагревания сверла.

Наибольшее влияние на стойкость инструмента с точки зрения износа оказывает скорость резания. Так, повышение скорости резания на 50 % снижает стойкость инструмента примерно на 75 %, в то время как аналогичное увеличение подачи снижает стойкость на 60 % [3].

Наибольшая скорость резания при сверлении приходится на периферию сверла и, казалось бы, наибольший износ должен также происходить на периферии. Однако изнашивается в первую очередь поперечная кромка сверла. Это связано с тем, что скорость износа зависит в первую очередь от силы трения между инструментом и обрабатываемым материалом. Сила трения на периферии режущей кромки сверла в  $\sin \varphi$  раз меньше, чем сила трения на поперечной кромке (здесь  $2\varphi$  – угол заточки сверла).

С точки зрения производительности имеет смысл повышать скорость резания. Однако это ведет к повышению температуры в зоне резания, усиленному износу и сокращению ресурса сверла. Попытка при этом ориентироваться на заявленный поставщиком ресурс может приводить к появлению дефектов отверстия, т.е. к отказу процесса сверления.

Скорость резания при сверлении определяется простым соотношением

$$V_{\text{рез}} = \pi d n / 1000,$$

где  $V_{\text{рез}}$  – скорость резания (м/мин);  $d$  – диаметр сверла (мм);  $n$  – скорость вращения шпинделя (об./мин).



При уменьшении диаметров отверстий для достижения рекомендованных поставщиком сверл или выявленных технологическим скоростями резания требуются все большие скорости вращения шпинделя.

Скорость резания определяется частотой вращения шпинделя и диаметром сверла. Для достижения желаемой производительности при уменьшении диаметра получаемого отверстия требуется увеличение частоты вращения шпинделя. При постоянной скорости подачи увеличение частоты вращения шпинделя ведет к увеличению температуры в зоне резания.

### **Заключение**

1. Критерием ресурса сверла является не износ режущей кромки, за которым трудно следить, а отказ процесса сверления, под которым понимается возникновение дефектов сверления.

2. Основным условием возникновения отказа процесса сверления является достижение температуры в зоне резания, превышающей температуру стеклования связующего композитного материала.

3. Основным параметром, влияющим на температуру в зоне резания, является сила трения, зависящая от скорости подачи сверла.

4. Влияние скорости резания на температуру носит временной характер. Чем выше скорость резания при прочих равных условиях, тем дольше режущая кромка взаимодействует с телом платы, т.е. тем дольше действует источник возникновения теплоты.

### **Список литературы**

1. Медведев, А. М. Печатные платы. Механическое сверление / А. М. Медведев // Технологии в электронной промышленности – 2012. – № 8. – С. 74–81.
2. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2014. – 480 с.
3. Юрков, Н. К. Выбор метода определения температурного коэффициента линейного расширения отвердевшего эпоксидного клея / Н. К. Юрков, С. С. Исаев // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 162–163.
4. Краткий справочник металлиста / под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. – М. : Машиностроение, 1986. – 960 с.
5. Ординарцев, И. А. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов. – М. : Машиностроение, 1987. – 846 с.
6. Косилова, А. Г. Справочник технолога-машиностроителя / А. Г. Косилова, Р. П. Мещеряков. – М. : Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 495 с.

#### **Ванцов Сергей Васильевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра технологии приборостроения,  
Московский авиационный институт  
(125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)  
E-mail: vancov@medpractika.ru

#### **Медведев Аркадий Максимович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра технологии приборостроения,  
Московский авиационный институт  
(125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)  
E-mail: medvedevam@bk.ru

#### **Зве Маунг-Маунг**

аспирант,  
Московский авиационный институт  
(125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)  
E-mail: zwemaungmaung@gmail.com

#### **Vancov Sergej Vasil'evich**

candidate of technical science, associate professor,  
sub-department of avionic technology,  
Moscow Aviation Institute  
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

#### **Medvedev Arkadij Maksimovich**

doctor of technical science, professor,  
sub-department of avionic technology,  
Moscow Aviation Institute  
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

#### **Zve Maung-Maung**

postgraduate student,  
Moscow Aviation Institute  
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

**Хомутская Ольга Владиславовна**

аспирант,  
Московский авиационный институт  
(125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)  
E-mail: khomutskauaov@gmail.com

**Аннотация.** Сегодня весь монтаж технических средств электроники и, в частности, авионики строится на печатных платах, неизбежно имеющих сквозные монтажные металлизированные отверстия, выполняющие роль трансверсальных соединений. Основания печатных плат авионики – фольгированные медью композиционные материалы на основе стеклоткани с эпоксидным связующим. Основной способ получения отверстий в основаниях плат – сверление. От качества сверления во многом зависит надежность трансверсальных межслойных соединений и надежность аппаратуры в экстремальных условиях эксплуатации. В результате проведенных исследований сформулированы критерии качества сверления, предложены условия формирования качественных отверстий, несколько отличающихся от общепринятых представлений.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, авионика, сверление композитов, сверла, металлизированные отверстия.

**Homutskaja Ol'ga Vladislavovna**

postgraduate student,  
Moscow Aviation Institute  
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

**Abstract.** Today, the whole installation technical means of electronics and avionics, in particular, is built on printed circuit boards, inevitably with pass-through mounting metal vents that act as transversal connections. Printed circuit board-avionics Foundation foiled copper composites on the basis of the fiberglass with epoxy binder. The main way of getting holes in the bases-drilling. The quality of drilling largely depends on the reliability of the transversal interlayer connections and equipment reliability under extreme operating conditions. Research drilling quality criteria are formulated, proposed conditions.

**Key words:** composite materials, avionics, composites drilling, drills, metallized vias.

**УДК 621.3.049.75 : 678.067.029.46 : 621.396**

**Анализ процесса сверления отверстий в композиционных материалах оснований печатных плат / С. В. Ванцов, А. М. Медведев, Зве Маунг-Маунг, О. В. Хомутская // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 37–44.**