

На правах рукописи
УДК 621.3.049, 621.95.01

Зве Маунг Маунг

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ
ДЕФЕКТОВ НА ОПЕРАЦИИ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Специальность 05.11.14 – «Технологии приборостроения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

(МАИ)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Ванцов Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: **Суминов Игорь Вячеславович**
доктор технических наук, профессор
директор научно-исследовательского центра плазменно-электролитных технологий МГТУ «СТАНКИН»
Павлов Николай Иванович
кандидат технических наук, главный технолог, Акционерное общество «Навис-Электроника»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева"
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Защита состоится «___» _____ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212. 141. 18 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5 стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5 стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212. 141. 18.

Автореферат разослан «___» _____ года.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д 212. 141.18

к т. н., доцент



Мешков С. А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Требования к современным изделиям приборостроения, в том числе авионики, в значительной мере предполагают обработку и представление управляющих сигналов в цифровой форме. Аппаратно это реализуется с помощью различного рода модулей на печатных платах, которые нуждаются во все большей плотности межсоединений в трехмерных структурах. Межсоединения в трансверсальном направлении реализуются металлизированными отверстиями. По мере увеличения степени интеграции и плотности компоновки электронных компонентов растет количество таких переходных отверстий в платах. В связи с этим надежность и технический уровень печатных плат непосредственно связаны с обеспечением качества технологических операций получения отверстий в их композитных основаниях.

Переходные и монтажные отверстия являются неременным конструктивным атрибутом печатных плат, которые используются для:

- электрического соединения между сторонами платы;
- монтажа дискретных штыревых компонентов, в том числе для пайки выводов компонентов в отверстия с целью обеспечения как механического крепления, так и надежного электрического контакта.

Количество таких отверстий в одной плате может составлять до нескольких тысяч штук.

Получение отверстий может осуществляться различными технологическими методами: штамповкой, лазерной обработкой и сверлением: 1–2%, 2–3% и 96–97% соответственно.

Поэтому несмотря на разнообразие технологических приемов, в настоящее время не существует реальной альтернативы процессам сверления для получения монтажных и переходных отверстий. Данный способ позволяет получать отверстия в широком диапазоне диаметров: от 0,05 мм до 6 мм и более, что делает его использование актуальным и современным.

Одновременно следует отметить, что получение отверстий в печатных платах обладает определенной спецификой, связанной с тем, что обработке подвергаются композиционные материалы, используемые для диэлектрического основания плат.

Изучением проблемы процессов механической обработки композиционных материалов занимались многие российские ученые, в том числе, П.И.Буловский, Н.А.Петрова, В.А.Можаров, Г.В.Мылов, А.М.Сержантов, М.Махмудов, А.М.Медведев и др. Однако анализ работ этих ученых показал, что в их работах основное внимание уделялось в основном или классическим вопросам обработки композиционных материалов резанием, или влиянию инструмента и станочного оборудования на режимы обработки.

Вместе с тем, недостаточно изученными остались вопросы получения отверстий, связанные с тем, что композиционные материалы, используемые для оснований плат, имеют неоднородную структуру. Такие материалы представляют собой связующее на основе полимеров, армированное стекловолокном и

покрытое медной фольгой. При этом стекловолокно, в общем случае, распределено внутри связующего случайным образом.

Поэтому следует признать **своевременной и актуальной**, имеющей важное научное и практическое значение работу, направленную на предотвращение дефектов на операции сверления отверстий при изготовлении печатных плат.

Объектом исследования является технологическая операция получения монтажных и переходных отверстий в печатных платах.

Предметом исследования являются технологические режимы сверления, обеспечивающие сокращение брака при производстве печатных плат.

Цель диссертационной работы

Целью работы является разработка способа предотвращения дефектов внутренней поверхности отверстий печатных плат.

Основные задачи исследования:

1. Определить доминирующий фактор, влияющий на возникновение дефектов внутренней поверхности отверстий в композиционном основании печатных плат, и установить его применимость для контроля технологической операции сверления с целью предотвращения их возникновения.

2. Разработать математическую модель, дающую возможность производить прогнозирование момента времени возникновения дефектов на операции сверления при изготовлении печатных плат и экспериментально подтвердить ее адекватность.

3. Разработать аппаратно-программный комплекс для определения момента времени возникновения дефектов поверхности отверстий в процессе сверления печатных плат.

Научная новизна

Новыми научными результатами, полученными автором, являются:

1. Выявлено, что основной причиной возникновения дефектов внутренней поверхности отверстий является повышение в результате износа сверла температуры в зоне резания выше температуры стеклования связующего в композитном материале, и определены закономерности ее циклического изменения.

2. Построена математическая модель развития тепловых явлений при сверлении отверстий в печатных платах, позволяющая определять изменения значений температуры вершины сверла в ходе технологической операции сверления отверстий в печатных платах, влияющей на развитие дефектов их внутренней поверхности.

3. Предложен способ предотвращения дефектов на операции сверления отверстий при изготовлении печатных плат, базирующийся на измерении усилия сверления, оказывающего основное влияние на развитие температуры в зоне резания.

Практическая значимость

1. Разработан аппаратно-программный комплекс для определения момента времени возникновения дефектов поверхности отверстий в процессе сверления печатных плат.

2. Получены аналитические выражения для практических расчетов параметров и режимов технологической операции сверления, позволяющие предотвратить появление дефектов внутренней поверхности отверстий в композитных материалах печатных плат.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Гипотеза, что основной причиной возникновения дефектов внутренней поверхности отверстий является повышение в результате износа сверла температуры в зоне резания выше температуры стеклования связующего в композитном материале.

2. Математическая модель развития тепловых явлений при сверлении отверстий в печатных платах, позволяющая определять изменения значений температуры вершины сверла в ходе технологической операции сверления отверстий в печатных платах, влияющей на развитие дефектов их внутренней поверхности.

3. Способ предотвращения дефектов на операции сверления отверстий при изготовлении печатных плат, базирующийся на измерении усилия сверления, оказывающего основное влияние на развитие температуры в зоне резания.

Методы исследования

В работе использовались фундаментальные и прикладные положения технологии приборостроения, материаловедения, теплофизики и математической физики (раздел «теплообмен»). Экспериментальные исследования проводились с использованием апробированных методик, современного технологического оборудования и поверенных измерительных приборов.

Реализация результатов и предложения об использовании

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы ООО «Остек-Сервис-Технология» в проектах обновления производств прецизионных печатных плат и в учебном процессе кафедры «Технология приборостроения» Московского авиационного института.

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуется использовать для определения на этапе подготовки производства режимов и параметров технологических операций сверления отверстий в печатных платах, а также применять для контроля хода этих операций с целью предотвращения дефектов внутренней поверхности отверстий.

Апробация

Апробация основных результатов проводилась на научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: XXIV международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Алушта, 2015 г); XLII международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2016 г); XXV международная научно-техническая конференция «Современные техно-

логии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (Алушта, 2016 г); 15-я международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2016 г); XLIII международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2017 г); XXVI Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (Алушта, 2017 г); 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2017 г); XLIV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2018 г); XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (Алушта, 2018 г); 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2018 г).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 10 статей в журналах из перечня ВАК РФ.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура работы

Работа состоит из 4 глав, введения, заключения, списка литературы и приложения; содержит 118 страниц текста, 28 рисунков, 10 таблиц. Список литературы включает 72 источника.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, определено ее содержание, указаны основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер.

Рассмотрены требования к качеству монтажных и переходных отверстий в печатных платах. Пример возникающих дефектов внутренней поверхности монтажного отверстия на примере двусторонней печатной платы приведен на Рис. 1 и 2.



Рис. 1. Буртик и подъем фольги на выходе из отверстия (съемка сделана в косом свете)

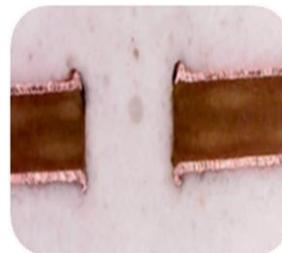


Рис. 2. Микрошлиф буртика, подъема и отслоения фольги на входе и выходе сверла

Данные поставщиков сверл не позволяют гарантировать отсутствие таких дефектов. Эти данные базируются на превышении износа режущей кромки сверла выше некоторого, задаваемого поставщиком предела.

Рассмотрим гипотезу, по которой возникновение дефектов возникает в результате развития температуры в зоне сверления выше температуры стеклования композитного материала основания печатной платы.

На Рис. 3–6 показаны графики изменения температуры вершины сверла в процессе сверления и достижения ею предельных значений $T_{пр}$, определяемых температурой стеклования композиционных материалов и ведущих к возникновению дефектов отверстий.

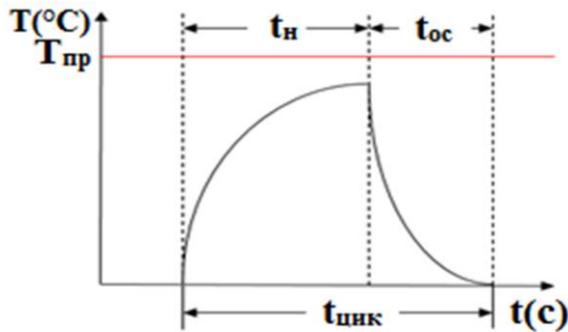


Рис. 3. График изменения температуры в цикле сверления одного отверстия, где: T — температура; t — время; $t_{цикл}$ — время цикла сверления; $t_н$ — время нагревания сверла; $t_ос$ — время остывания сверла; $T_{пр}$ — предельная допустимая температура в зоне резания, определяемая температурой стеклования

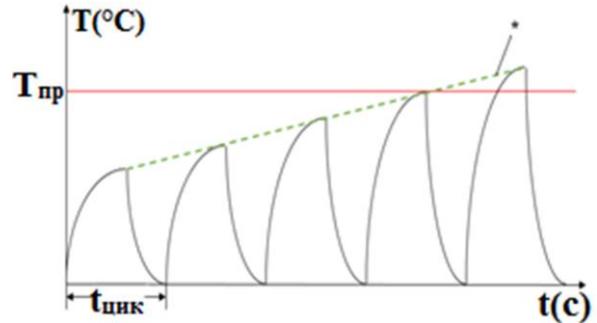


Рис. 4. График достижения предельной температуры в зоне резания за счет увеличения скорости нарастания температуры, где: $T_{пр}$ — предельная допустимая температура в зоне резания

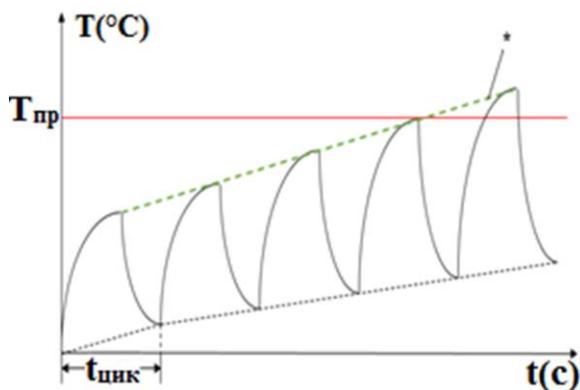


Рис. 5. График достижения предельной температуры в зоне резания за счет скорости нарастания температуры и неполного остывания сверла до исходной температуры в течение одного цикла сверления

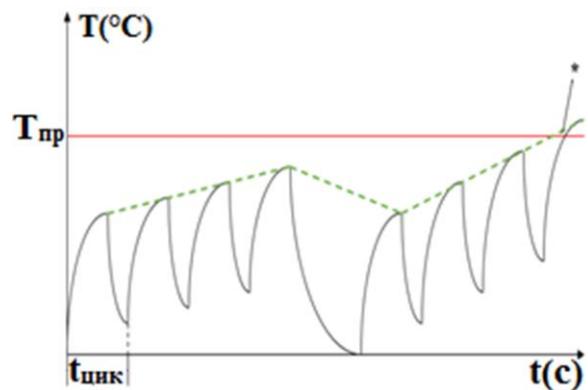


Рис. 6. Обобщенный график достижения предельной температуры в зоне резания с учетом топологии платы

На Рис. 4–6 значком *показана огибающая максимальных значений температуры.

Представленные на Рис. 4–6 графики определяют все случаи возможного изменения температуры в зоне резания в зависимости от особенностей конструкции печатной платы.

Проблемы, возникающие в процессе сверления монтажных и переходных отверстий в печатных платах обусловлены значительными различиями в твердости компонентов материалов основания, а именно:

- Армирующих волокон диэлектрического основания, которые, как правило, изготавливаются из стекла.
- Связующего на основе полимеров,
- Медной фольги.

Средняя твердость стекла по Бринеллю составляет 500 НВ. Средняя твердость меди составляет 35 НВ. Твердость полимерного связующего сильно зависит от состояния диэлектрического основания, в первую очередь от температуры.

В качестве связующего в диэлектрическом основании FR-4 наиболее часто в настоящее время используется эпоксидная смола.

Определяющей характеристикой связующего при сверлении является температура стеклования (T_g), т.е. температура, при которой полностью отвержденная смола начинает размягчаться.

Температура стеклования для FR-4 обычно составляет от 130 до 200°C. Для повышения температуры стеклования в состав связующего вводят различные добавки (например, полиимид), что, однако, приводит к увеличению твердости и, как следствие, вызывает при одинаковых режимах резания повышенный нагрев сверла.

Проведенный анализ влияния характеристик композиционного материала основания печатных на износ режущих кромок позволяет сделать следующие заключения:

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. В силу случайного расположения в композитном материале участков с существенно разной твердостью процесс износа режущих кромок сверла носит случайный характер.

Основным инструментом для получения монтажных отверстий в печатных платах являются твердосплавные сверла. Они изготавливаются из карбида вольфрама с присадками карбида кобальта (ВК6, ВК8).

В процессе сверления за счет износа температура в зоне резания достаточно быстро достигает температуры стеклования, что приводит к образованию

дефектов отверстий. Это является сигналом того, что сверло выработало свой ресурс, который в среднем составляет около 1000 отверстий.

Поставщики сверл для получения монтажных отверстий указывают их ресурс только приблизительно, в среднем и определяют его исходя из величины износа режущих кромок, которая является сложно определяемой в ходе осуществления технологической операции.

Режимы сверления оказывают наибольшее влияние на температуру в зоне сверления, определяющую возникновение дефектов внутренней поверхности отверстий.

Из выше изложенного можно заключить, что:

1. Ресурса сверла определяется не износом режущей кромки, а отказом процесса сверления, под которым понимается возникновение дефектов внутренней поверхности отверстий. Таким образом, можно сделать вывод о том, что декларируемый поставщиком сверл ресурс не гарантирует получение заявленного количества просверленных отверстий без дефектов на их внутренней поверхности. Вместе с тем, не существует технической возможности выявления дефекта внутренней поверхности отверстия неразрушающими методами.

2. Основным условием возникновения отказа процесса сверления является достижение температуры в зоне резания, превышающей температуру стеклования связующего композитного материала. Из этого анализа можно предположить, что доминирующим фактором, влияющим на возникновение дефектов внутренней поверхности отверстий, является температура в зоне резания.

Объективным критерием отказа процесса сверления является появление дефектов отверстий, которые, в свою очередь, возникают из-за развития в зоне резания предельных температур, определяемых величиной температуры стеклования композитного материала.

Таким образом, основанием для остановки процесса сверления до появления дефектов отверстий может являться достижение температуры в зоне резания значения температуры стеклования композитного материала основания печатной платы.

Это позволяет высказать предположение, что изменение температуры в зоне резания можно использовать для контроля технологической операции получения отверстий в композиционных материалах оснований печатных плат.

Контроль изменения температуры сверла как доминирующего фактора, влияющего на появление дефектов, может являться удобным способом предотвращения брака.

Из сделанных выводов следует постановка задачи:

Разработка и исследование способа предотвращения дефектов поверхности монтажных и переходных отверстий, получаемых на технологической операции сверления, позволяющего снизить процент брака при изготовлении печатных плат.

Вторая глава посвящена построению математической модели тепловых явлений при получении отверстий в ходе технологической операции сверления

отверстий в печатных платах и разработки способа контроля технологической операции сверления отверстий печатных плат.

При анализе источников тепла, возникающего в зоне резания, было показано, что основная работа при резании стеклопластиков состоит из работы сил трения по задней поверхности инструмента, которая может быть определена выражением

$$A_{зп} = \mu N v \tau \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения; v – окружная скорость сверла (скорость резания) в точке приложения силы N ; τ – время; N – сила, направленная по нормали к задней поверхности сверла.

При сверлении температура режущих кромок и рабочих поверхностей сверла изменяется во времени. Таким образом, имеет место нестационарный тепловой процесс. Особенности сверления печатных плат позволяют сделать ряд допущений, упрощающих построение математической модели рабочего процесса.

Учитывая, что диаметр сверла достаточно мал по сравнению с его длиной ($L_{св}/d = 30 \div 50$), можно считать процесс распространения тепла одномерным, направленным вдоль оси сверла в направлении от его вершины.

Температуру в плоскости сечения сверла, перпендикулярной продольной оси сверла, можно считать постоянной.

Относительно невысокая теплопроводность материалов сверла (ВК-8) дает основание при составлении уравнения теплопроводности рассматривать сверло как одномерный изотропный полуограниченный стержень. Полуограниченность вытекает из того, что температура конца сверла, прилегающего к державке, в процессе сверления остается практически постоянной, равной температуре окружающей среды.

Исходя из сделанных допущений, можно записать уравнение теплопроводности в виде

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + b[T - T_c] \quad (2)$$

где $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – скорость изменения температуры во времени; T – температура сверла; T_c – температура среды; x – координата температурного поля, отсчитываемая от вершины сверла; $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ – скорость изменения температурного градиента; $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент температуропроводности; $b = \frac{p\alpha}{c\gamma S_0}$ – коэффициент теплообмена со средой; α – удельный коэффициент конвективного теплообмена; S_0 – площадь изотермической поверхности (площадь поперечного сечения сверла); p – периметр сверла; λ – коэффициент теплопроводности материала сверла; c – коэффициент теплоемкости материала сверла; γ – плотность материала сверла.

Это уравнение, в свою очередь, распадается на два уравнения: для этапа нагревания сверла и этапа его охлаждения.

Задача для этапа нагревания сводится к поиску температурного поля полуограниченного изотропного стержня без боковой теплоизоляции. Ограничи-

вающая торцовая поверхность нагревается постоянным тепловым потоком $q_c = \text{const}$.

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \\ T(x, 0) = T_0 = \text{const} \\ \lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + q_c = 0 \\ T(\infty, \tau) = T_0; \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Решение этого уравнения операторным или классическим методами для вершины сверла с учетом специфики процесса сверления имеет вид:

$$T(0, \tau) = \frac{1,1284\mu Nv}{\lambda S_0} \sqrt{a\tau} + T_0 \quad (4)$$

Задача для этапа охлаждения имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + b[T(x, \tau) - T_c] \\ T(x, 0) = CierfcKx + T_c; \\ T(\infty, \tau) = T_c; \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} = 0, \\ \text{где } K = \frac{1}{2\sqrt{a\tau}}; C = \frac{2\mu Nv}{\lambda S_0} \sqrt{a\tau}; \end{cases} \quad (5)$$

Решения этого уравнения для вершины сверла с учетом цикличности процесса сверления имеет вид:

$$T(0, \tau) = \frac{C}{\sqrt{\pi}} e^{-b\tau} \left(1 + \frac{\tau}{2\tau_H}\right) + T_c \quad (6)$$

Таким образом, сформировано уравнение теплопроводности для расчета тепловых полей при сверлении композитных материалов мелкоразмерными сверлами.

Соотношение (4) позволяет определять изменение во времени температуры вершины сверла в ходе резания с учетом режимов и параметров процесса.

Полученные соотношения (4, 6) позволяют определять изменение температуры при переходе инструмента от предыдущего отверстия к последующему (остывание сверла) и учитывающее, в том числе, время сверления предыдущего отверстия (нагревание сверла).

Вместе с тем, если соотношение (6), позволяющее рассчитывать температуру вершины сверла во время перехода от отверстия к отверстию, т.е. определяет режим охлаждения, является полностью детерминированным, то в соотношении (4), определяющем режим нагревания, присутствует параметр N , представляющий собой силу, направленную по нормали к задней поверхности сверла, величина которого является величиной случайной, определяемой неоднородным составом обрабатываемого материала. Эта сила связана с усилием подачи следующим выражением:

$$N = \frac{(0,3 \div 0,4)}{\cos\varphi} P \quad (7)$$

где P – осевое усилие подачи сверла; 2φ – угол при вершине сверла.

Как было ранее показано, значение усилия подачи, в силу специфики обработки композитных материалов, имеет случайный характер. Поэтому соотношение (3) можно отнести к квазидетерминированным зависимостям, определяющим вероятностный характер развития тепловых явлений в зоне резания.

Для определения разброса параметра N разработано специальное устройство и проведена серия экспериментов по определению зависимости величины осевого усилия подачи от числа просверленных отверстий. Определение усилия проведено для различных режимов сверления и диаметров используемых сверл.

Для каждого набора исходных (12 наборов) данных проводилась серия из 10 реализаций, в каждой из которых было просверлено от 5 до 10 тысяч отверстий. Экспериментально полученный типичный вид изменения усилия N в зависимости от числа просверленных отверстий показан на Рис. 7.

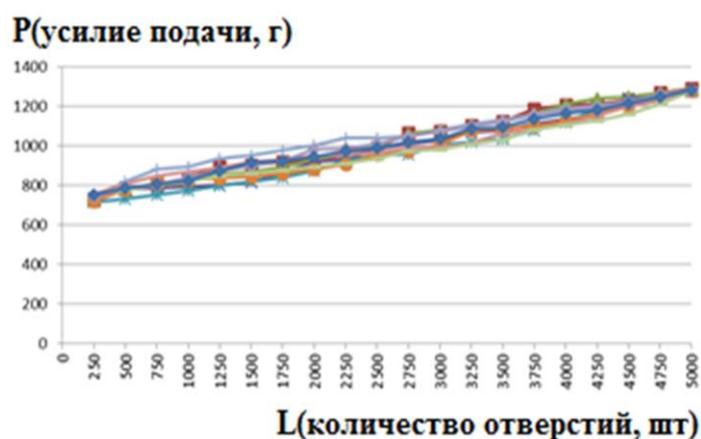


Рис. 7. Типичный вид экспериментальных зависимостей усилия подачи от числа просверленных отверстий

адекватность разработанной математической модели экспериментальным данным.

Построенная математическая модель и результаты экспериментальных исследований позволяют сформировать способ предотвращения дефектов на операции сверления отверстий при изготовлении печатных плат. Суть способа заключается в том, что во время каждого цикла сверления измеряется усилие подачи сверла. Полученное реальное значение усилия используется для расчета с помощью построенной модели температуры в зоне резания. Если рассчитанное значение не превышает температуры стеклования, то осуществляется следующий цикл сверления. При достижении температуры в зоне резания температуры стеклования технологическая операция прерывается и производится замена инструмента.

Обработка результатов экспериментальных зависимостей позволила получить статистически значимую величину ($p=0,05$) разброса усилия подачи от среднего значения в 12%.

Сопоставление полученной модели с ранее известными эмпирическими зависимостями в диапазоне их существования показало расхождение значений температуры вершины сверла, не превышающее 10%, что подтверждает

Алгоритм реализации данного способа приведен на Рис. 8.

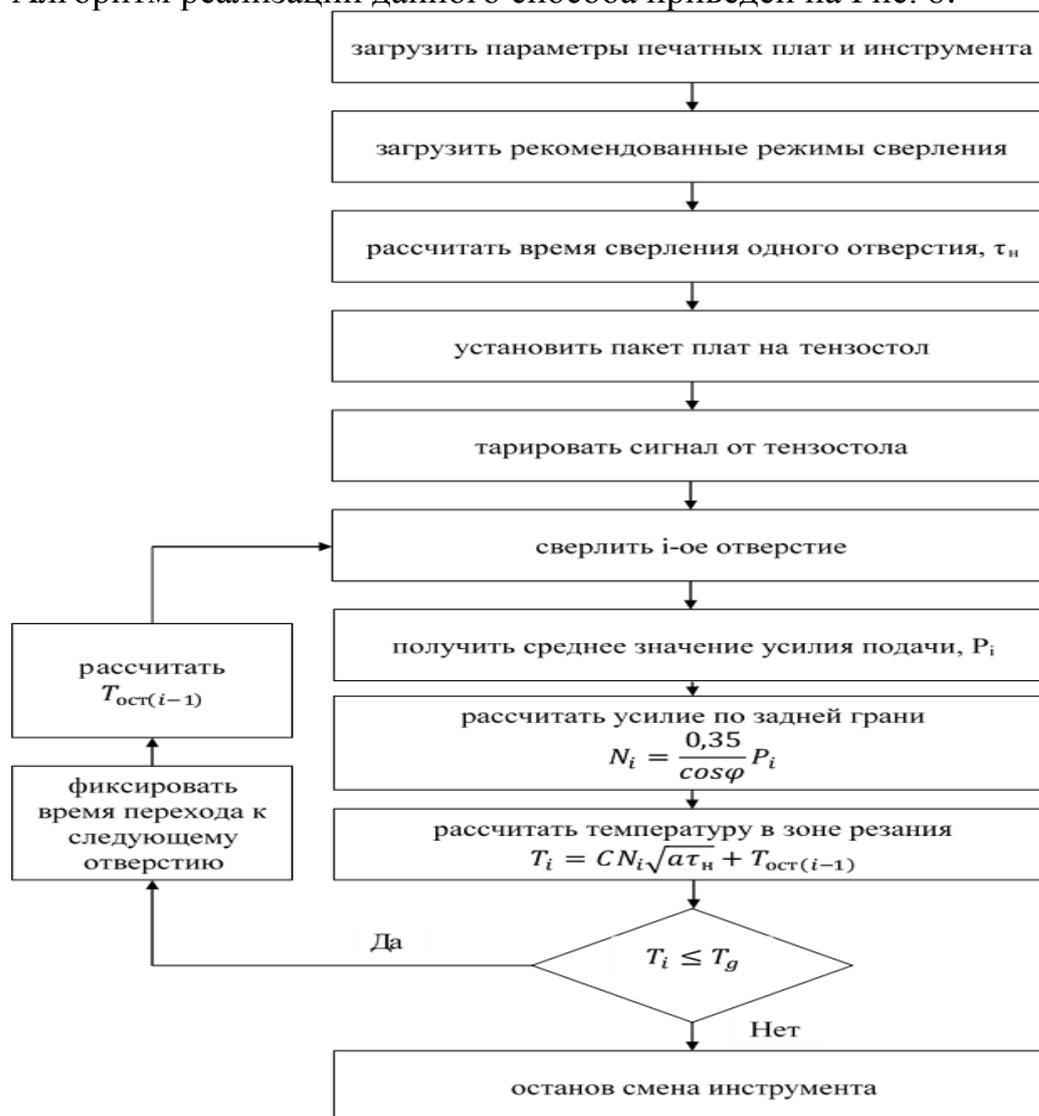


Рис. 8. Алгоритм реализации способа предотвращения дефектов внутренней поверхности отверстий в печатных платах

Таким образом, в данной главе:

1. Проанализированы источники, влияющие на изменение теплового поля в зоне сверления, и выявлена их связь с режимами обработки и параметрами материалов инструмента и обрабатываемого материала.
2. Построена математическая модель развития тепловых явлений при сверлении отверстий в печатных платах, дающая возможность производить прогнозирование момента времени появления дефектов на их внутренней поверхности.
3. Получены выражения, позволяющие определять изменение температуры вершины сверла в течение цикла сверления отверстия.
4. При сопоставлении расчетов температуры в зоне резания по разработанной модели и ранее полученных экспериментальных данных расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 10%.

5. Предложен способ предотвращения дефектов на операции сверления отверстий при изготовлении печатных плат.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию эффективности предложенного способа предотвращения дефектов на операции сверления отверстий при изготовлении печатных плат.

Для проверки эффективности разработанного способа предотвращения дефектов поверхности отверстий разработан аппаратно-программный комплекс определения количества отверстий, которое может быть получено без возникновения брака.

Базой аппаратной части комплекса является созданный тензометрический измеритель, позволяющий определять усилие подачи при сверлении. Измеритель монтируется непосредственно на рабочий стол сверлильного станка. В качестве станка использовался сверлильно-фрезеровальный станок Bungard NEC.

Сигналы от тензоизмерителя после усиления обрабатываются с помощью измерительно-вычислительного комплекса (Arduino Mega 2560) и передаются на персональный компьютер. Измерение усилия производится со скоростью 100 отсчетов в секунду.

Общий вид установки, на которой проводились исследования аппаратно-программного комплекса, приведен на Рис. 9.

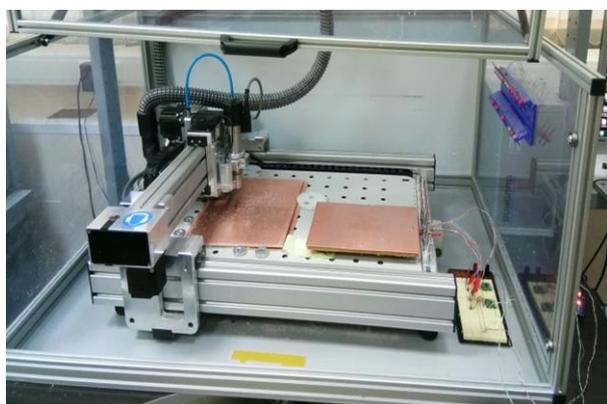


Рис. 9. Общий вид экспериментальной установки для проверки предлагаемого аппаратного метода диагностирования начала возникновения дефектов отверстий

Эксперимент проверки работоспособности комплекса и эффективности разработанного алгоритма проводился для печатных плат, материалом оснований которых являлся стеклотекстолит FR-4. Количество слоев варьировалось от 3 до 8. Для каждого варианта печатной платы использовалось 10 сверл из ВК8 диаметром 1,1 мм. Остановка технологической операции сверления осуществлялась при достижении в зоне сверления температуры стеклования композитного материала, равной 130°C. Появление дефекта отверстия определялось по появлению буртика на выходе отверстия.

Характерные результаты использования разработанного алгоритма для условий проведения одного из экспериментов представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Экспериментально установленное количество отверстий до остановки процесса сверления

Номер сверла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество отверстий до остановки процесса	2744	2812	2608	2200	2268	2676	2404	2540	2336	2472
Дефект обнаружен	Да	Нет	Да							

(условия эксперимента: материал FR-4, количество слоев – 8)

Представленные результаты позволяют утверждать, что в 9 случаях из 10 операция сверления была остановлена правомочно и лишь в одном случае сверление могло быть продолжено.

Для условий данного эксперимента поставщиком сверл был заявлен ресурс, равный 2500 отверстий. Это позволяет утверждать, что операцию получения отверстий следует останавливать для предотвращения брака по данным использования разработанного комплекса.

Суммарно по результатам всех проведенных экспериментов работы комплекса необходимость остановки процесса по разработанному алгоритму составляла около 80%.

В рабочем режиме комплекса предельная температура при реализации разработанного алгоритма устанавливалась на 1–2 градуса Цельсия ниже температуры стеклования. В этом случае дефекты поверхности отверстий не наблюдались.

Проведенный эксперимент по использованию разработанного аппаратно-программного комплекса позволяет утверждать о его эффективности, позволяющей остановить течение технологической операции сверления до наступления отказов операции по критерию возникновения дефектов на внутренней поверхности отверстия.

Четвертая глава содержит рекомендации по использованию полученных аналитических зависимостей для предотвращения возникновения дефектов при сверлении отверстий в печатных платах для спектра материалов и режимов обработки.

Построенная модель тепловых явлений позволяет получить ряд зависимостей для определения параметров и режимов процесса сверления печатных плат, способствующих предотвращению дефектов внутренней поверхности отверстий, в том числе:

– минимальное время охлаждения сверла при переходе от отверстия к отверстию в зависимости от параметров рабочего процесса

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{0,378hd}{sv-0,378hdb} \ln\left(\frac{2,05T_{\text{кр}}\lambda S_0\sqrt{s}}{\mu N\sqrt{v}\cdot\sqrt{a}} \cdot \frac{1}{\sqrt{nd}}\right) \quad (8)$$

– критическое значение усилия N , которое возникает при достижении $T_{\text{кр}}$ в зоне резания.

$$N_{\text{кр}} = \frac{0,885(T_{\text{кр}} - T_0) \lambda S_0}{\mu v \sqrt{a \tau_0}} \quad (9)$$

– допустимую толщину одновременно просверливаемого пакета плат

$$Kh = \frac{\tau_0 S v}{0,189 d} \quad (10)$$

где K – количество двусторонних плат в пакете или количество слоев в многослойной плате, h – толщина одной двусторонней платы или одного слоя в многослойной плате.

Приведены примеры расчета:

- силы подачи исходя из допустимой температуры в зоне сверления (для управляющего контроля);
- величины подачи при заданной скорости резания, обеспечивающей отсутствие перегрева в зоне сверления;
- допустимой скорости резания при заданной подаче, обеспечивающей отсутствие перегрева в зоне сверления;
- допустимого числа просверливаемых отверстий исходя из режимов обработки и допустимой температуры в зоне сверления;
- минимального допустимого времени позиционирования, обеспечивающего отсутствие перегрева сверла.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Доминирующим фактором, влияющим на возникновение дефектов внутренней поверхности монтажных и переходных отверстий, является температура в зоне резания композиционного материала основания печатной платы.
2. Выявлено, что основным условием возникновения дефектов поверхности отверстий, а, следовательно, отказа технологической операции сверления, является достижение температуры сверла, равной температуре стеклования связующего композиционного материала основания печатной платы.
3. Проанализированы источники, влияющие на изменение теплового поля в зоне сверления, и выявлена их связь с режимами обработки и параметрами материалов инструмента и обрабатываемого материала.
4. Построена новая математическая модель развития тепловых явлений при сверлении отверстий в печатных платах, свободная от ограничений известных эмпирических моделей.
5. Определено, что основным фактором, влияющим на температуру в зоне сверления, является усилие подачи инструмента при остальных фиксированных параметрах и режимах технологической операции.
6. Разработан и исследован способ предотвращения дефектов на операции сверления отверстий при изготовлении печатных плат.
7. Разработано устройство для экспериментального определения усилия подачи в ходе технологической операции сверления отверстий.
8. Приведены примеры практических расчетов параметров и режимов процесса сверления с использованием полученных с помощью квазидетерминированной модели аналитических выражений для определения температуры вершины сверла.

9. Разработан, реализован и экспериментально опробован аппаратно-программный комплекс для предотвращения возникновения дефектов поверхности отверстий при изготовлении печатных плат и показана эффективность его использования.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

Основные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

1. Ванцов С.В., Зве Маунг Маунг. Исследование процесса тепловыделения при сверлении печатных плат // Труды МАИ. №90. 2016. С. 1–8. (1 п.л/0,5 п.л).

2. Ванцов С.В., Медведев А.М., Зве Маунг Маунг, Хомутская О.В. Анализ процесса сверления отверстий в композиционных материалах оснований печатных плат. // Надежность и качество сложных систем. № 2 (14). 2016. С. 37–44. (1 п.л/0,25 п.л).

3. Ванцов С.В., Медведев А.М., Зве Маунг Маунг, Хомутская О.В. Надежность процесса сверления печатных плат, понятие отказа. // Печатный монтаж. №8. 2016. С. 168–172. (1 п.л/0,25 п.л).

4. Ванцов С.В., Зве Маунг Маунг. Использование тепловой модели для определения параметров процесса сверления печатных плат. // Печатный монтаж. №6. 2017. С.190–192. (0,38 п.л/0,19 п.л).

5. Ванцов С.В., Зве Маунг Маунг. Влияние температуры на надежность процесса сверления печатных плат // Печатный монтаж. №2. 2017. С 174–178. (0,63 п.л/0,32 п.л).

6. Ванцов С.В., Зве Маунг Маунг. Квазидетерминированная модель тепловых явлений при сверлении композитных материалов. // Компетентность. №7. 2017. С. 16–19. (0,5 п.л/0,25 п.л).

7. Ванцов С.В., Зве Маунг Маунг, Войтковский С.В. Экспериментальное исследование усилия подачи при сверлении печатных плат. // Печатный монтаж. №8. 2017. С. 190–192. (0,38 п.л/0,13 п.л).

8. Ванцов С.В., Зве Маунг Маунг. Квазидетерминированная модель тепловых явлений при получении отверстий в печатных платах // Электроника НТБ. №1. 2018. С. 138–141. (0,5 п.л/0,25 п.л).

9. Зве М.М. Экспериментальное определение разброса значений усилия подачи при сверлении отверстий печатных плат // Труды МАИ. № 100. 2018. С. 1–15. (0,9 п.л/0,9 п.л).

10. Ванцов С.В., Медведев А.М., Зве Маунг Маунг. Аппаратный способ предотвращения дефектов отверстий печатных плат // Электроника НТБ. №8. 2018. С. 142–145. (0,5 п.л/0,17 п.л).

Публикации в сборниках материалов НТК.

11. Зве Маунг Маунг. Вопросы обеспечения качества монтажных отверстий в печатных платах // Труды XXIV международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 2015. С. 250. (0,13 п.л/0,13 п.л).

12. Зве Маунг Маунг. Влияние свойств материалов печатной платы на качество процесса сверления монтажных отверстий // XLII международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, 2016. С. 15–16. (0,25 п.л/0,25 п.л).
13. Зве Маунг Маунг. Отказ процесса сверления печатных плат // XXV международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», Алушта, 2016. С. 46. (0,13 п.л/0,13 п.л).
14. Зве Маунг Маунг. Изменение температуры сверла при сверлении печатных плат // 15-я международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 2016. С. 185. (0,13 п.л/0,13 п.л).
15. Зве Маунг Маунг. Исследование износа мелкоразмерных сверл // XLIII международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, 2017. С. 900. (0,13 п.л/0,13 п.л).
16. Зве Маунг Маунг. экспериментальное исследование усилия подачи при сверлении печатных плат // XXVI Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», Алушта, 2017. С. 157–158. (0,25 п.л/0,25 п.л).
17. Зве Маунг Маунг. Анализ износа с помощью сверла 0,8 мм при сверлении печатных плат // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 2017. С. 450–451. (0,25 п.л/0,25 п.л).
18. Зве Маунг Маунг. Экспериментальное определение разброса значений усилия подачи при сверлении печатных плат // XLIV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, 2018. С. 173. (0,13 п.л/0,13 п.л).
19. Зве Маунг Маунг. Определение температуры вершины сверла при сверлении отверстий в печатных платах // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», Алушта, 2018. С. 246–247. (0,25 п.л/0,25 п.л).
20. Зве Маунг Маунг. Тензометрический прибор для измерения усилия подачи в ходе процесса сверления печатных плат // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 2018. С. 180–182. (0,38 п.л/0,38 п.л).