

Квазидетерминированная модель тепловых явлений при получении отверстий в печатных платах

С. Ванцов, к. т. н.¹, Зве Маунг Маунг²

УДК 621.3.049, 621.95.01 | ВАК 05.11.14

В опубликованных ранее работах [1, 2] было показано, что основным фактором, определяющим надежность процесса сверления по критерию качества получаемых отверстий, является динамика нагрева вершины сверла. В силу зависимости от режимов и параметров процесса обработки, часть которых в большей или меньшей степени подвержена случайным отклонениям, она носит случайный характер. Поэтому для получения более точного представления о температурных процессах при сверлении требуется применение вероятностного подхода. В статье приведены данные, позволяющие на этапе технологической подготовки осуществлять имитационное моделирование процесса сверления с учетом случайного характера развития его тепловых характеристик.

Задача обеспечения надежности процесса сверления мелкоразмерных отверстий в печатных платах решается технологами-практиками при каждом запуске новой партии изделий в производство. Под надежностью в данном случае понимается отсутствие производственного брака. Технолог определяет количество отверстий, которое может быть просверлено одним сверлом таким образом, чтобы были удовлетворены все требования к качеству отверстий: отсутствие буртиков на входе и выходе сверла, определенная шероховатость внутренней поверхности отверстий и т. п. При этом в первую очередь ориентируются на гарантированное поставщиками сверл количество сверлений. Однако данные поставщиков являются сугубо усредненными, они не учитывают конкретных для данного предприятия режимов и параметров процесса сверления; поэтому окончательное решение технолога в значительной мере определяется его опытом.

ГОСТ 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения» предписывает понимать надежность как «...свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания». При этом под готовностью понимается «...способность изделия выполнить требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены». А под безотказностью понимается «...способность изделия выполнить требуемую функцию в заданном

интервале времени при данных условиях». Исходя из этого, поставщик в своих гарантиях ориентируется на износ сверла до предела, обеспечивающего осуществление процесса резания материала; очевидно, что при таком подходе требование по обеспечению качества отверстий не учитывается.

В [1] было введено понятие отказа процесса сверления по критерию качества отверстий и показано, что решающим сигнальным параметром в этом случае является величина температуры в зоне резания, а моментом, ограничивающим непрерывную работу станка с данным сверлом, – достижение температуры стеклования материала связующего основания платы.

Параметры, влияющие на динамику нагрева вершины сверла: теплопроводность материала, коэффициент трения, температуропроводность, скорость резания, площадь поперечного сечения сверла, усилия подачи – могут иметь случайные отклонения от среднего значения. Таким образом, можно говорить, что температура сверла также является случайной величиной, зависящей от времени. Для получения максимально близкого к действительности результата при расчете времени наступления отказа по критерию качества отверстий необходимо определить основные характеристики вероятностного процесса достижения вершиной сверла температуры стеклования – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение от него.

Нами было получено (см. [2]) выражение для расчета температуры вершины сверла в ходе сверления одного отверстия:

¹ МАИ (НИУ), доцент, vancov@medpraktika.ru.

² МАИ (НИУ), аспирант, zwemaungmaung@gmail.com.

$$T(0, \tau) = \frac{1,1284 \mu N v}{\lambda s} \sqrt{a \tau}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения по задней грани сверла; N – сила, направленная по нормали к задней поверхности; v – окружная скорость сверла (скорость резания) в точке приложения силы N ; λ – коэффициент теплопроводности материала сверла; s – площадь поперечного сечения сверла; a – коэффициент теплоотдачи, τ – время.

При рассмотрении выражения (1) следует учитывать, что не все отклонения фигурирующих в нем параметров достаточно велики, чтобы вносить практически значимый вклад в расчет тепловых характеристик процесса сверления. Параметры материалов основания и инструмента, а также режимы сверления в рамках работы с одной партией материала, с инструментом от одного поставщика остаются практически постоянными, их случайные колебания для целей нашего исследования рассматриваются как пренебрежимо малые. В значительных пределах меняется только один параметр – сила N , направленная по нормали к задней поверхности режущей кромки. Основная масса электронных изделий собирается на платах из композиционных материалов (чаще всего это FR4), состоящих из двух различных по твердости компонентов – эпоксидной смолы в качестве связующего и стекла в качестве армирующего, – распределенных в массиве основания печатной платы случайным образом. В силу этого величина силы N носит выражено случайный характер.

С учетом этих соображений выражение для расчета температуры вершины сверла в ходе сверления одного отверстия принимает вид:

$$T(\tau) = 1,124 AN \sqrt{B \tau} + T_0, \quad (2)$$

где A и B – постоянные коэффициенты, в которых обобщены характеристики конкретных режимов сверления и свойства материалов платы и инструмента, случайные отклонения которых приняты как пренебрежимо малые.

Выражение (2), являющееся функцией времени и содержащее случайный аргумент – силу N , может быть использовано в качестве квазидетерминированной модели развития тепловых явлений в процессе сверления всех отверстий на плате [3]. Эта модель позволяет прогнозировать достижение вершиной сверла температуры стеклования и, следовательно, наступление отказа по критерию качества отверстий с использованием методов имитационного моделирования.

Случайные отклонения от среднего значения силы N , причина которых описана выше, порождают семейство статистических характеристик изменения температуры в зоне резания, показанное на рис. 1.

Фактически, это семейство статистических характеристик описывает вероятностный процесс наступления отказа процесса сверления по критерию качества отверстий, поскольку достижение вершиной сверла температуры T_g и является причиной такого отказа. Соответственно, параметры m_0 , M_0 и σ вероятностного процесса, отображенного этими характеристиками, трактуются как соответствующие параметры случайного процесса наступления отказа.

Распределение статистических характеристик по ансамблю (мгновенное распределение) будет подчиняться, исходя из условий существования, нормальному закону распределения. Вместе с тем закон распределения моментов достижения семейством в целом температуры стеклования будет соответствовать асимметричному нормальному. В этом случае плотность распределения отказов по критерию качества отверстий будет иметь вид

$$f_{om}(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - M_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение моментов возникновения отказов по критерию качества; K – текущее количество просверленных отверстий.

Кривую изменения математического ожидания мгновенных распределений можно определить при помощи имитационного моделирования. Моделирование представляет собой серию расчетов изменения температуры вершины сверла во времени с использованием

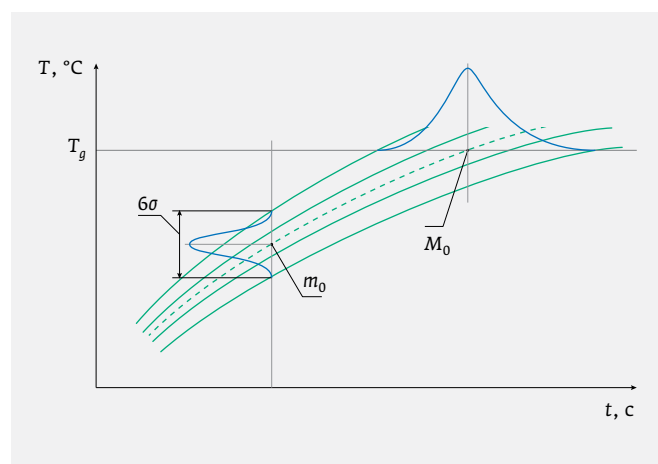


Рис. 1. Статистические характеристики значений температуры вершины сверла, достигаемых в ходе последовательного сверления отверстий: m_0 и σ – соответственно математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение мгновенного распределения семейства; M_0 – математическое ожидание момента достижения температурой вершины сверла значения температуры стеклования материала основания печатной платы

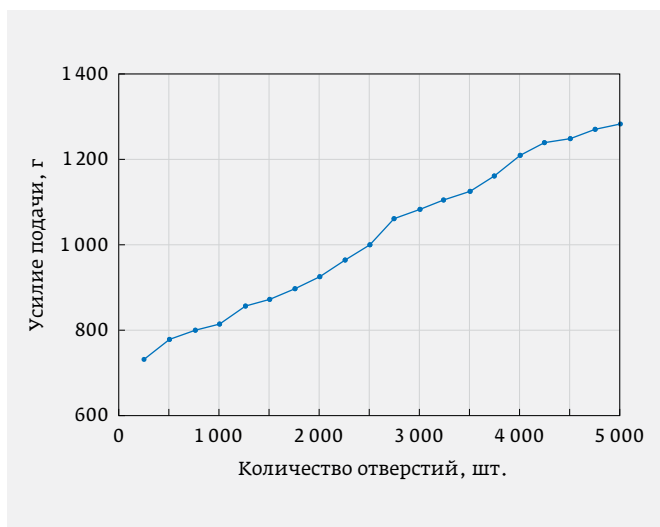


Рис. 2. Типичная зависимость усилия подачи от числа просверленных отверстий

выражения (2) при подстановке различных значений силы N в каждом из расчетов. Однако для этого надо знать диапазон возможных отклонений силы N от среднего значения. Кроме того, для практического применения соотношения (3) необходимо определить дисперсию мгновенного распределения статистических характеристик на рис. 1.

Сила N однозначным образом связана с усилием подачи при сверлении. Поэтому дисперсия мгновенного распределения статистических характеристик на рис. 1 будет равна дисперсии усилия подачи. Для определения разброса этого усилия была проведена серия экспериментов. Использовался разработанный нами тензометрический стол (подробно см. [4]), сверление проводилось на сверлильно-фрезеровальном станке Bimgard сверлами из сплава BK8 диаметром 1,1 мм при скорости вращения шпинделя 60 тыс. об/мин. Скорость подачи составляла 2600 мм/мин, скорость резания – 188,4 м/мин. Эксперимент проводился на односторонних печатных платах из материала FR4 толщиной 1,5 мм. Количество просверленных в каждом эксперименте отверстий составляло 5000, что существенно превышает заявленный поставщиком гарантированный ресурс в 1800 отверстий. На рис. 2 представлена типичная полученная зависимость изменения усилия сверления от числа просверленных отверстий.

Интересный результат получен при аппроксимации этой зависимости (использовался метод наименьших квадратов). Как видно на рис. 3, наиболее приближенным к экспериментальным данным вариантом аппроксимации является линейная функция. Вместе с тем базовые представления теории резания утверждают, что

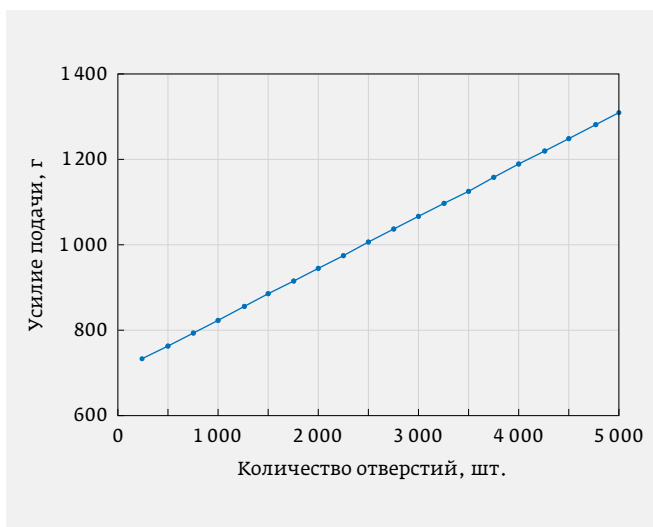


Рис. 3. Типичный результат аппроксимации усилия подачи от числа просверленных отверстий

рост усилия подачи должен носить нелинейный характер, определяемый нарастающим износом режущей кромки инструмента по мере увеличения пути резания, то есть в нашем случае – с ростом числа просверленных отверстий. Этот, казалось бы, парадоксальный результат можно объяснить тем, что в действительности количество отверстий, которое может быть получено используемыми сверлами, превышает заявленный поставщиком ресурс сверлений. Фактически, это подтверждает гарантии поставщика: заявленный им ресурс исключает отказ процесса сверления по критериям, установленным ГОСТ 27.002-2009.

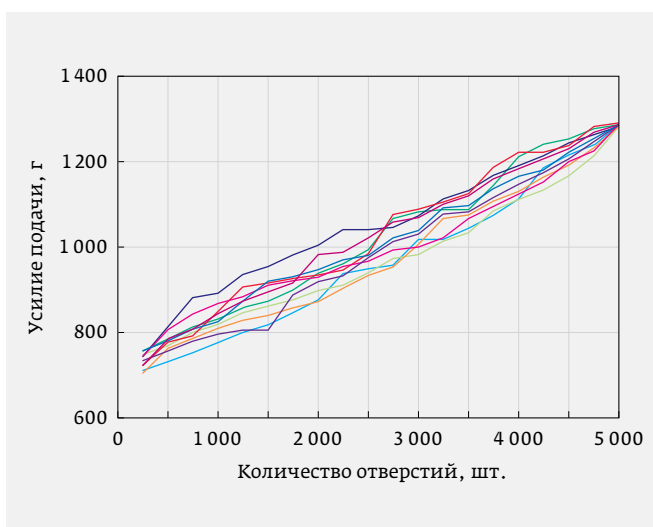


Рис. 4. Суммарное графическое представление экспериментальных зависимостей усилия подачи от числа просверленных отверстий

Однако предметом нашего исследования является другой тип отказа – отказ по критерию качества просверленных отверстий. А он, как показано в [1], может произойти раньше, чем сверло выработает заявленный ресурс, что определяет актуальность построения и использования квазидетерминированной модели для оценки степени нагрева вершины сверла. С ее помощью на этапе подготовки производства может быть осуществлено имитационное моделирование и установлено количество отверстий, которое можно получить в конкретных технологических условиях без отказа процесса сверления.

Для установления величины разброса усилия подачи, обусловленного случайным характером процесса резания композитных материалов, была проведена серия экспериментов, результаты которых суммарно представлены на рис. 4. Обработка этих результатов позволила получить статистически значимую величину разброса усилия подачи в 12%. Таким образом, можно утверждать, что величина среднеквадратического отклонения статистических характеристик, представленных на рис. 1, не превышает 2% от математического ожидания, рассчитываемого с использованием выражения (1).

Предложенные формулы и полученные экспериментальные данные позволяют на этапе подготовки

к сверлению монтажных и переходных отверстий в конкретной партии печатных плат производить имитационное моделирование динамики нагрева вершины сверла, получая оценку вероятности отказа по критерию качества отверстий для разного числа сверлений, что дает возможность, фактически, управлять уровнем брака производственного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ванцов С., Медведев А., Маунг Маунг З., Хомутская О.** Надежность процесса сверления печатных плат, понятие отказа // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 8. С. 168–172.
2. **Ванцов С., Зве Маунг Маунг.** Влияние температуры на надежность процесса сверления печатных плат // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 2. С. 174–178.
3. **Ванцов С. В., Зве Маунг Маунг.** Квазидетерминированная модель тепловых явлений при сверлении композитных материалов // Компетентность. 2017. № 7.
4. **Ванцов С., Зве Маунг Маунг, Войтковский С.** Экспериментальное исследование усилия подачи при сверлении печатных плат // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 8. С. 190–192.