

УДК 621.3.049, 621.95.01

## **Экспериментальное определение разброса значений усилия подачи при сверлении отверстий печатных плат**

**Зве Маунг Маунг**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия  
e-mail: zwemaungmaung@gmail.com*

### **Аннотация**

В статье определена экспериментальная зависимость усилия сверления от числа просверленных отверстий при сверлении монтажных и переходных отверстий в печатных платах. Приведены выражения для расчета температуры в зоне резания и статистические характеристики семейства огибающих максимальных значений температуры вершины сверла. Выявлена дисперсия мгновенного распределения температуры вершины сверла.

**Ключевые слова:** усилие подачи, тензостол, число просверленных отверстий, печатная плата, температура вершины сверла, сила, направленная по нормали к задней поверхности.

### **Введение**

По данным [1,2] рынок производства в России одно- и двухсторонние печатные платы в стоимостном выражении составляет около 50%. Оставшийся

объем рынка занимают многослойные, гибкие и гибко-жесткие платы. Анализ современных технологий производства электронных средств показал, что обеспечение надежности является наиболее ответственным этапом процесса изготовления печатных плат [9,10]. Количество монтажных и переходных отверстий в одной плате может составлять до нескольких тысяч штук [3]. Изучением проблемы процессов сверления в композиционных материалах занимались многие российские ученые, в том числе, П.И.Буловский, Н.А.Петрова[4], А.Н.Резников[5], В.Н.Подураев[6], М.Махмудов[7], А.М.Медведев[8] и др. Дефекты появились в поверхности отверстий при сверлении печатных плат. Возникновение этих дефектов связано в первую очередь с нагреванием сверла во время сверления. При этом точность сверления весьма значительно влияет на качество печатной платы, которое, в свою очередь, зависит и от качества совмещения слоев и от параметров материала [15–17]. Следует отметить, что дефекты, образовавшиеся на этапе сверления, не только могут привести к отказам, но и повышают себестоимость изделий за счет удорожания последующих этапов [18], так как требуют введения в процесс изготовления печатных плат дополнительных операций. Надежность процесса сверления зависит от: материала диэлектрического основания и фольги; инструмента, в основном сверл; станочного оборудования; режимов сверления; человеческого фактора. Проблемы обеспечения процесса сверления монтажных отверстий в печатных платах обусловлены значительными различиями в твердости компонентов материалов основания. 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 увода сверла от оси отверстия и биения. 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 [11]. В ходе сверления нагревание происходит во время сверления отверстия за счет силы трения по задней поверхности сверла. Остывание сверла осуществляется при переходе инструмента от отверстия к отверстию. Образованное семейство функций позволяет статистически оценивать разброс технологических характеристик сверл в пределах одной партии и, как следствие, прогнозировать стойкость сверл, а, следовательно, вероятность возникновения отказа процесса сверления отверстий. В каждый момент времени разброс максимальных значений температуры в цикле нагревание-охлаждение будет подчиняться, исходя из условий существования, нормальному закону распределения. В соответствии с мгновенным распределением закон распределения моментов достижения огибающими температуры стеклования будет соответствовать асимметричному нормальному [12]. Эксперимент показал степень разброса значений усилия подачи при сверлении отверстий в печатных платах.

Экспериментально определение изменения усилия сверления от числа проверенных отверстий позволяет рассчитать разброс силы, направленной по нормали к задней поверхности. Эта сила существенно влияет на температуру в зоне резания при сверлении печатных плат. Процесс тепловыделения при сверлении можно свести к классической задаче нагревания полубесконечного теплоизолированного стержня с внутренним постоянно действующим источником тепла[19]. Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности в процессе сверления будет иметь вид[20]:

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

где  $\frac{\partial T}{\partial \tau}$  – скорость изменения температуры во времени;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  – скорость изменения температурного градиента;  $b$  – коэффициент теплообмена со средой;  $T$  – температура сверла;  $T_c$  – температура среды.

С учетом этого выражения можно получить выражение температуры вершины сверла при сверлении отверстий в печатных платах.

### **Выражение температуры вершины сверла при сверлении печатных плат**

Выражение для расчета температуры вершины сверла в ходе сверления одного отверстия имеет вид [14]:

$$T(0, \tau) = \frac{1,1284 \mu N v}{\lambda s_0} \sqrt{a\tau_0} + T_0$$

где  $\mu$ – коэффициент трения;  $N$ – сила, направленная по нормали к задней поверхности;  $v$ – окружная скорость сверла (скорость резания) в точке приложения силы  $N$ ;  $\lambda$ – коэффициент теплопроводности материала сверла;  $S_0$  – площадь изотермической поверхности (площадь поперечного сечения сверла);  $a$ – коэффициент температуропроводности;  $\tau_0$  – время сверления одного отверстия;  $T_0$  – температура окружающей среды [13].

В значительных пределах меняется только один параметр  $N$ , 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. Поэтому для проведения расчетов необходимо знать диапазон возможных отклонений силы  $N$  от среднего значения, т.е. для практического применения необходимо определить дисперсию мгновенного распределения статистических характеристик на рис. 1.

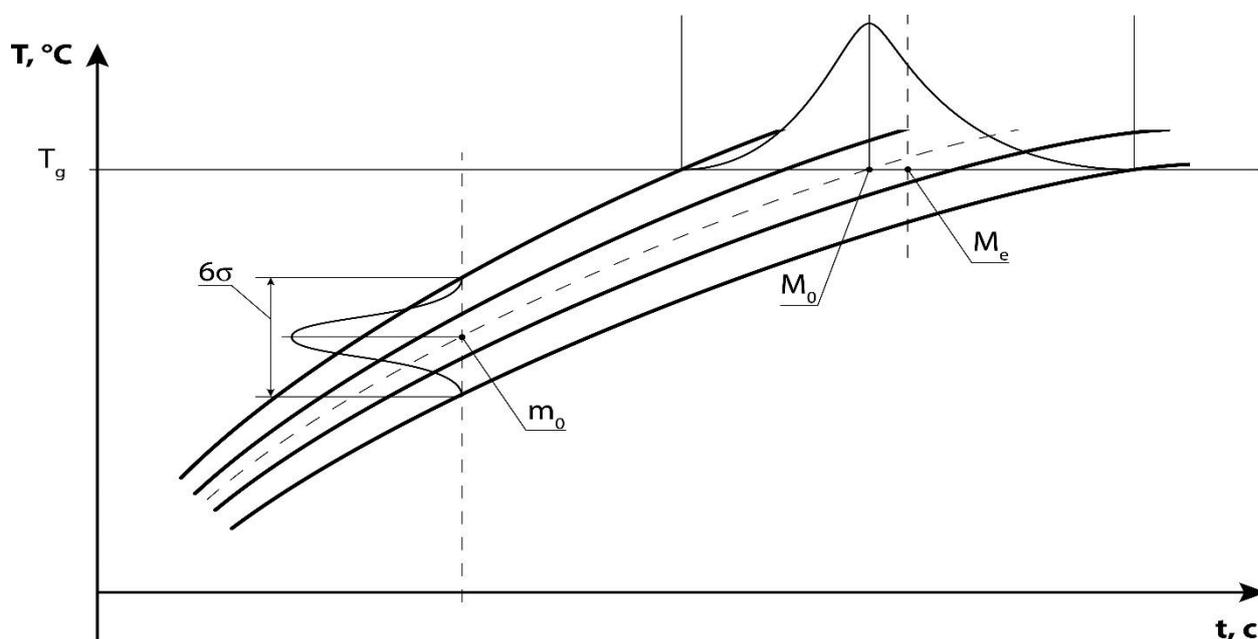


Рис. 1. Статистические характеристики семейства огибающих максимальных значений температуры вершины сверл

где:  $m_0$  и  $\sigma$  – соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение мгновенного распределения семейства;  $M_0$  – математическое ожидание момента достижения огибающей температуры стеклования материала основания печатной платы;  $M_e$  – медианное значение момента достижения семейством огибающих температуры стеклования.

Случайные отклонения от среднего значения силы  $N$ , причина которых порождают семейство статистических характеристик изменения температуры в зоне резания. Фактически, это семейство статистических характеристик описывает вероятностный процесс наступления отказа процесса сверления по критерию качества отверстий, поскольку достижение вершиной сверла температуры и является причиной такого 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

$$f_{\text{кач}}(t) = \frac{1}{\sigma_{\text{кач}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_n K - M_0)^2}{2\sigma_{\text{кач}}^2}}$$

где  $\sigma_{\text{кач}}$  – среднеквадратичное отклонение моментов возникновения отказов по критерию качества;  $K$  – текущее количество просверленных отверстий.

Сила  $N$  однозначным образом связана с усилием подачи  $P_{\text{ос}}$  при сверлении

$$N = \frac{(0,3 \div 0,4)}{\cos \varphi} \cdot P_{\text{ос}}$$

где  $P$  – осевое усилие подачи сверла;  $2\varphi$  – угол при вершине сверла.

Поэтому дисперсия мгновенного распределения статистических характеристик на рис. 1 будет равна дисперсии усилия подачи. Для определения степени разброса параметра  $N$  было разработано специальное устройство и проведена серия экспериментов по определению зависимости величины осевого усилия подачи от числа просверленных отверстий. Для экспериментального определения  $P$  был разработан тензостол, электрическая схема которого представлена на рис. 2.

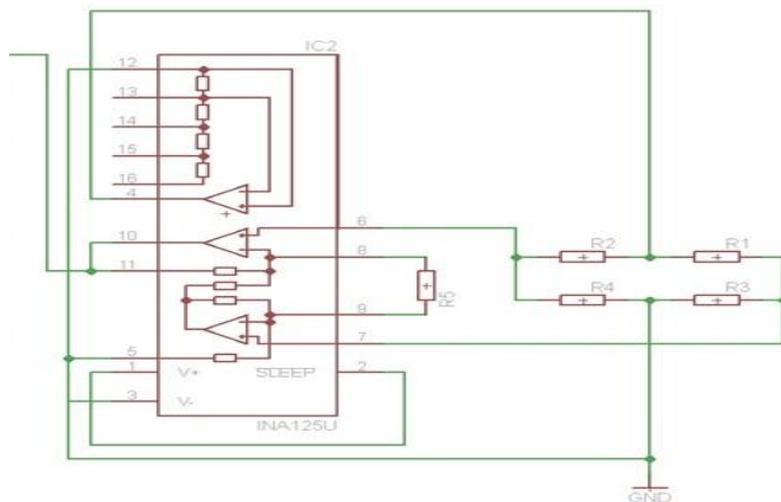


Рис. 2. Электрическая схема тензостол для определения усилия подачи.

Тензостол имеет прямоугольную форму размером 230x170 мм. Для уменьшения погрешности получаемых данных по углам стола расположены 4 тензодатчика соединенных попарно по мостовой схеме с операционными усилителями. Сигналы после усиления обрабатываются с помощью аппаратной платформы Arduino Mega 2560 и передаются на персональный компьютер. Измерение усилия производится со скоростью 100 отсчетов в секунду. Такая частота снятия отсчетов позволяет анализировать изменения усилия подачи в течение сверления одного отверстия, что дает возможность оценивать, в том числе, изменение усилия при прохождении медной фольги, эпоксидной смолы и стекловолокна.

В начале каждого эксперимента измерение усилия проводилось через каждые 250 посверленных отверстий. После 1000 отверстий интервалы измерения были увеличены, поскольку общая тенденция изменения усилия, связанная с износом режущей кромки сверла, оказывалась выявленной. Для снижения погрешности перед каждым измерения проводилось тарирование тензостол.

Пример графического отображения усилия подачи при проведении измерения в ходе сверления десяти отверстий подряд приведен на рис. 3.

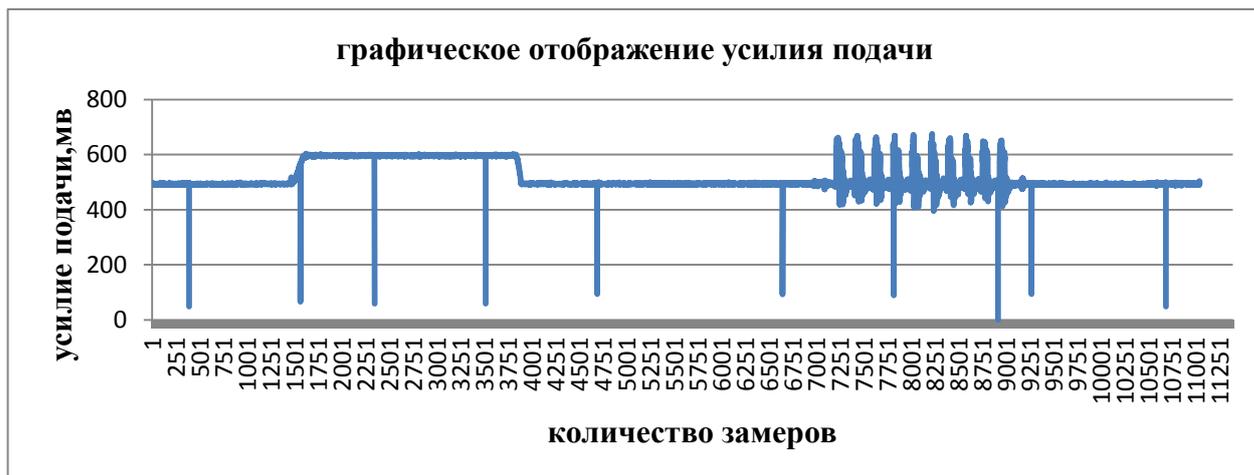


Рис. 3. Пример графического отображения изменения усилия подачи.

Сверление проводилось на сверлильно-фрезеровальном станке (Bungard). Эксперимент проводился на двусторонних печатных платах из материала FR4 толщиной 1,5 мм при скорости вращения шпинделя 60 тыс. об/мин. Скорость подачи составляла 2600 мм/мин. Сверление проводилось сверлами из сплава ВК8 диаметром 1,1 мм. Скорость резания при этом составляла 207,37 м/мин. Количество просверленных отверстий составляло 5000 штук, что существенно превышало заявленный поставщиком для данной партии сверл гарантированный ресурс в 1800 отверстий.

На рис. 4 представлена типичная полученная зависимость изменения усилия сверления от числа просверленных отверстий.

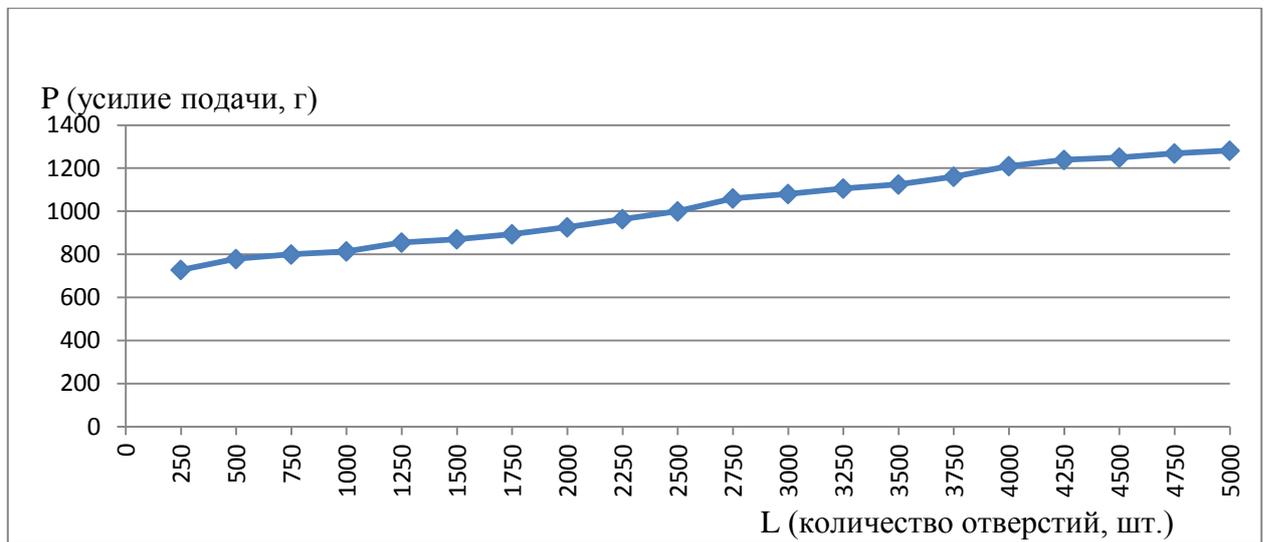


Рис. 4. Типичная зависимость усилия подачи от числа просверленных отверстий.

Наиболее приближенной к экспериментальной является в данном случае линейная функция. Вместе с тем базовые представления теории резания утверждают, что характер изменения должен носить нелинейный характер, поскольку это связано с износом режущей кромки инструмента, который будет значительно возрастать при увеличении пути резания, т.е. в нашем случае от числа просверленных отверстий. Кажется бы парадоксальный результат можно объяснить тем, что в действительности количество отверстий, которое может быть получено используемыми сверлами превышает заявленное поставщиком количество. Это означает, что заявленный поставщиком ресурс износа сверла не позволит достигнуть отказа процесса сверления по критериям, заявленным в ГОСТ 27.002-2009. Однако отказ может произойти по критерию качества, что определяет актуальность построения и использования квазидетерминированной модели для оценки степени нагрева вершины сверла. С ее помощью может быть осуществлено на этапе подготовки производства имитационное моделирование процесса и

установлено количество отверстий, которое может в конкретных технологических условиях получено без отказа процесса.

Для установления величины разброса усилия подачи, обусловленного случайным характером процесса резания композитных материалов, была проведена серия экспериментов, результаты которых суммарно представлены на рис. 5.

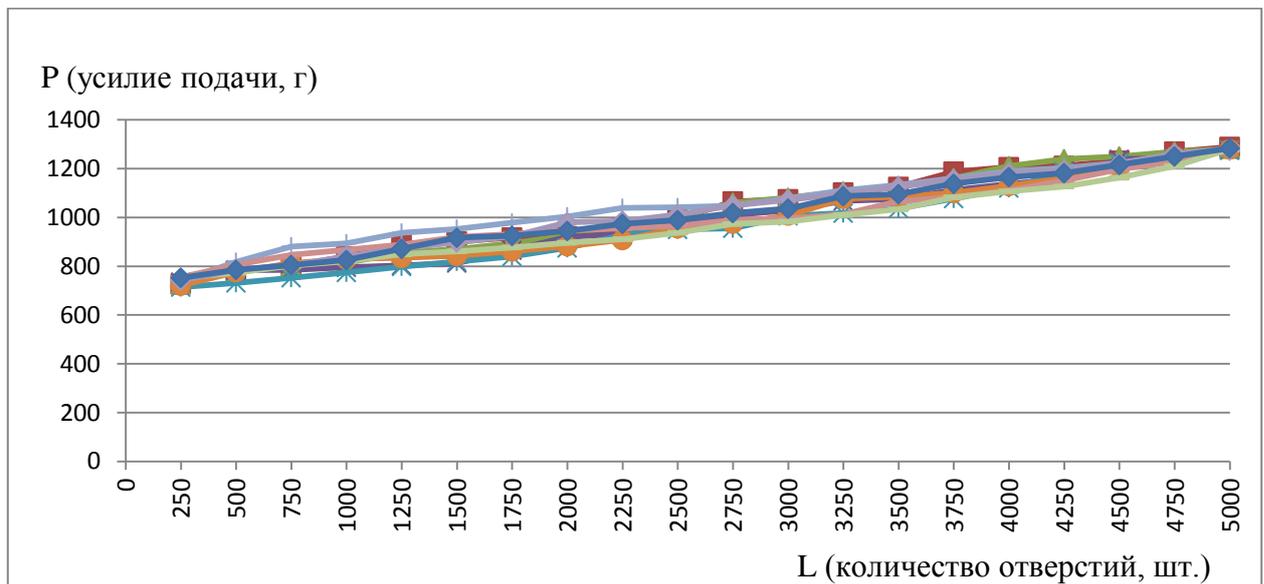


Рис. 5. Суммарное графическое представление экспериментальных зависимостей усилия подачи от числа просверленных отверстий.

Обработка по методу наименьших квадратов экспериментальной зависимости, представленной на рис.5, позволяет установить математическое ожидание изменения усилия подачи от числа просверленных отверстий (рис. 6).



Рис. 6. Суммарная линейризованная экспериментальная зависимость усилия подачи от числа просверленных отверстий.

Математическое ожидание имеет вид:

$P = 715 + 11L$ , где  $P$  – осевое усилие в граммах;  $L$  – количество просверленных отверстий  $\times 100$ .

Обработка результатов экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 5, 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). Полученные экспериментальные данные позволяют производить на этапе подготовки к сверлению монтажных и переходных отверстий конкретной партии печатных плат имитационное моделирование развития тепловых явлений в ходе технологической операции и обеспечить отсутствие появления брака.

## **Заключение**

1. Разработано устройство получения и обработки сигналов тензодатчиков для целей получения экспериментальных зависимостей изменения усилия осевой подачи при сверлении от числа просверленных отверстий.
2. Проведен эксперимент, результаты которого позволяют оценить степень разброса усилия подачи, а также установить функцию изменения усилия по времени.
3. Полученные экспериментальные данные позволяют проводить имитационное моделирование процесса изменения температуры вершины сверла с целью установления на этапе подготовки производства количества отверстий, которое может быть получено без отказа процесса по критерию качества.

## **Библиографический список**

1. Многослойные печатные платы. URL: [http://www.pk-altonika.ru/articles\\_type\\_1\\_16.htm](http://www.pk-altonika.ru/articles_type_1_16.htm)
2. Концепция развития российского производства печатных плат. URL: [http://www.pk-altonika.ru/articles\\_type\\_1\\_12.htm](http://www.pk-altonika.ru/articles_type_1_12.htm).
3. Медведев А., Сержантов А. Иллюстрированная технология печатных плат. Двусторонние печатные платы с металлизацией отверстий // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 1. С. 30 - 32.
4. Буловский П.И., Петрова Н.А. Механическая обработка стеклопластиков. - Л: Машиностроение, 1969. - 152 с.

5. Медведев А.М. Технология производства печатных плат. - М: Техносфера, 2005. - 360 с.
6. Буланова М.В., Подураев В.Н. Исследование температуры резания при точении органопластиков. - М: Труды МВТУ им. Баумана, № 5, 1979. С.18 – 22.
7. Махмудов М. Механическая обработка печатных плат. - М: Радио и связь, 1986. - 72 с.
8. Резников А.Н. Теплофизика резания. - М: Машиностроение, 1969. - 228 с.
9. Медведев А.М. Печатные платы. Механическое сверление // Технологии в электронной промышленности. 2012. № 8. С. 74 – 81.
10. Юрков Н.К. Технология производства электронных средств. - СПб.: Лань, 2014. - 480 с.
11. Ванцов С.В., Медведев А.М., Зве Маунг Маунг, Хомутская О.В. Анализ процесса сверления отверстий в композиционных материалах печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2. С. 37 - 44.
12. Ванцов С.В., Медведев А.М., Зве Маунг Маунг, Хомутская О.В. Надежность процесса сверления, понятие отказа // Электроника НТБ. 2016. № 8. С. 168 – 172.
13. Зве Маунг Маунг, Ванцов С.В. Влияние температуры на надежность процесса сверления печатных плат // Электроника НТБ. 2017. № 2. С. 174 – 178.
14. Зве Маунг Маунг, Ванцов С.В. Квазидетерминированная модель тепловых явлений при сверлении композитных материалов // Компетентность. 2017. №7/148. С. 16 - 19.

15. Можаров В.А., Шуман К.В. Адаптация техпроцесса подготовки производства печатных плат высокого класса точности под заданные параметры геометрической стабильности базового материала // Труды МАИ. 2012. № 50. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28828>
16. Можаров В.А. Математическая модель зависимости усадки стеклотекстолита от его конструкционных параметров // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40666>
17. Можаров В.А. Математическая модель пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах авионики // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40198>
18. Васильев Ф.В. Снижение себестоимости изделий для авиационно-космической техники, изготавливаемых методами послойного синтеза // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: [http://trudymai.ru/published.php?ID=28139&PAGEN\\_2=2](http://trudymai.ru/published.php?ID=28139&PAGEN_2=2)
19. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М: Высшая школа, 1967. - 600 с.
20. Толочков Ю.А., Ванцов С.В. Надежность рабочего процесса сверления печатных плат // Приборы и системы управления. 1976. № 5. С. 48 – 50.