

Микроразмерные твердосплавные сверла с упрочняющим покрытием. Анализ потребительских свойств

Статья посвящена проблеме использования упрочняющих покрытий на микроразмерных твердосплавных сверлах, предназначенных для обработки печатных плат, — общим вопросам проведения испытаний и анализу качества информации, предлагаемой производителями данного инструмента. Показаны типичные несоответствия предоставляемых данных о ресурсе твердосплавных сверл с покрытием и реально востребованных сведений, необходимых для принятия обоснованного решения о высоких характеристиках этого инструмента. Дана общая схема построения исследований инструмента для выявления конкурентных преимуществ, а также рекомендации, позволяющие повысить качество информационных материалов, в том числе рекламных, приведен пример использования предложенной схемы для выбора критерия и оценки ресурса сверла.

Вопрос качества представления информации, изложенный в статье, акцентирует внимание на особенностях, имеющих отношение непосредственно к сведениям рекламного характера о микроразмерных твердосплавных сверлах с упрочняющими покрытиями для обработки печатных плат. Однако сама по себе данная проблема гораздо шире и может рассматриваться в общем, применительно к качеству предоставляемых информационных материалов по другим объектам.

Юрий Литвак

Юлия Боброва

Упрочняющие покрытия на инструменте. Достоинства метода упрочнения

Способы повышения стойкости режущего инструмента за счет формирования на его поверхности слоя с улучшенными физико-механическими характеристиками находят широкое применение практически во всех областях производства, где необходима механообработка. Идея получения «универсального» инструмента с различными свойствами материала по глубине не нова — так или иначе она реализуется уже не один век и по мере развития технологии создания и обработки материалов постоянно совершенствуется. На сегодняшний день одним из наиболее распространенных способов упрочнения режущего инструмента является образование на его поверхности прочного покрытия с низким коэффициентом трения [1]. Способы получения данных покрытий традиционно делятся на два основных класса: методы химического и методы физического осаждения, а также комбинированные методы. Основные производители оборудования для создания упрочняющих покрытий физическими методами — компании Balzers, Sulzer, Platit и другие.

В рекламных материалах компаний, выпускающих оборудование и оказывающих услуги по нанесению упрочняющих покрытий на инструмент заказчика, а также компаний, изготавливающих инструмент с покрытием, нередко приводится информация о том, что использование в производстве такого режущего инструмента, в частности сверла, предоставляет возможность существенно сократить издержки производителя [2–6]. Это достигается за счет совокупности следующих свойств покрытий:

- низкий коэффициент трения и высокая гладкость поверхности упрощает извлечение продуктов резания по стружкоотводящим канавкам, что помогает снизить потребление СОЖ, увеличить скорость обработки;
- высокая твердость обеспечивает снижение износа режущих кромок, способствует увеличению скорости обработки;
- химическая инертность обуславливает стойкость инструмента к окислению поверхности.

Благодаря перечисленным свойствам упрочняющих твердосплавных покрытий можно более эффективно использовать оборудование и снизить расход режущего инструмента [7].

Анализ примеров использования упрочняющих покрытий на микроразмерных твердосплавных сверлах для обработки отверстий печатных плат

Несмотря на широкое применение упрочняющих твердосмазочных покрытий на инструменте, предназначенном для работы в области машиностроения и точного приборостроения, в сфере производства печатных плат данный способ, позволяющий улучшить свойства режущего инструмента, пока распространен недостаточно. В ходе анализа материалов периодических изданий, посвященных вопросам технологии изготовления печатных плат, не удалось найти ни одной русскоязычной статьи, где упоминалось бы о результатах промышленного использования микроразмерных сверл с упрочняющими покрытиями. Зарубежные источники также представлены весьма скудно: в основном это статьи рекламного характера [5, 6, 8] и единственная научная статья, в которой проводится сравнение результатов использования двух различных покрытий на микроразмерных сверлах [9].

Однако сегмент рынка инструмента для выпуска печатных плат очень велик, и это, несомненно, должно привлекать производителей самого инструмента и покрытий к инновациям и созданию конкурентных преимуществ своих продуктов, в особенности, когда существуют примеры успешного внедрения технологии нанесения упрочняющих покрытий в других областях механообработки [1].

В каталогах производителей оборудования для нанесения покрытий указывается пригодность использования для механической обработки композиционных материалов (материалов на основе стеклянных и углеродных волокон) двух типов покрытий: углеродных алмазоподобных покрытий и покрытий на основе смеси нитридов титана и алюминия (AlTiN) [10, 11]. Данную информацию подтверждают и производители инструмента:

- Компания Hartner (Германия) применяет на микроразмерных сверлах для ПП покрытие AlTiN [12].
- Компания Mitsubishi Carbide (Япония) предлагает для обработки композиционных материалов на основе углеродного волокна твердосплавный инструмент с алмазоподобным покрытием [13].
- Компания Union Tool (Япония) наносит на микроразмерные сверла и фрезы для печатных плат алмазоподобное углеродное покрытие ULF [6, 8, 14].

Работоспособность инструмента с покрытием

Для достоверного определения увеличения ресурса режущего инструмента необходимо выбрать совокупность критериев, определяющих его работоспособность. Исходя из этимологии данного термина очевидно, что работоспособность сверла подразумевает возможность выполнения им своей главной функции — сверления. Согласно определению

Большого энциклопедического словаря [15], сверление — это образование сверлом сквозного или глухого цилиндрического отверстия в материале. Введем термин «работоспособное сверло». Работоспособное сверло должно обеспечивать возможность формирования отверстия установленного диаметра в материале, чьи физико-механические характеристики находятся в допустимом диапазоне значений для данного сверла. Однако для любого предприятия, использующего в своем технологическом процессе сверление, данное определение работоспособности сверла недостаточно. Оно не отражает требований к формируемому отверстию, например: шероховатость внутренней поверхности, допуск на форму или другие требования, обусловленные спецификой конкретного производства. Особенно наглядно это проявляется в области электронного приборостроения. Отверстия под металлизацию не должны допускать таких дефектов, как заусенцы и отслоение фольги на входе и выходе платы, расплющивание внутреннего слоя меди (шляпка гвоздя), вырыв частиц диэлектрика с внутренней поверхности отверстия и др. [16]. Чтобы не допустить возникновения вышеперечисленных дефектов, сверло должно сохранять не только целостность (отсутствие излома), но и все прочие параметры, в течение срока службы влияющие на качество формируемых отверстий.

Другой важный аспект сравнительной оценки двух конкурирующих технологий или способов достижения одного и того же результата в любом производстве — затраты на полученные результаты.

Таким образом, предложенное ранее определение работоспособности сверла требует дополнения, отражающего качество достигнутого результата и производительности. То есть сверло должно обеспечивать возможность формирования отверстия, параметры качества которого удовлетворяют всем стандартам данного производства и заявленной эффективности.

Итак, работоспособность подразумевает возможность одновременного удовлетворения режущего инструмента трем условиям¹:

- возможность проведения обработки в заявленных условиях (обрабатываемый материал, режимы);
- удовлетворительное качество результата обработки;
- заявленная производительность.

Анализ общих проблем качества представляемой информации о свойствах инструмента с покрытием

Утверждение производителей о том, что использование упрочняющих покрытий увеличивает ресурс инструмента (*tool life*), еще раз подтверждает его более высокие потребительские свойства. Как правило, в качестве аргу-

ментов приводятся результаты сравнительных тестов, в отдельных случаях с указанием режимов и условий проведения испытаний. Общим недостатком большинства примеров сравнения потребительских свойств предлагаемых товаров (будь то сверла, сверла с покрытием либо услуга «нанесение покрытия на инструмент») [18–21] является отсутствие информации о критериях, определяющих работоспособность в рамках решаемой задачи. Результаты сравнений несут информацию, на первый взгляд подчеркивающую преимущества представленных инструментов, однако в действительности не позволяющую сделать вывод об их более высоком ресурсе. Эти критерии оценки акцентируют внимание на состоянии самих сверл в ходе механообработки (целостность, величина износа, диаметр), однако никак не сопоставляются с техническими требованиями на производимый ими результат, то есть отверстия, формируемые в ходе конкретной технологической операции. Хотя фактически в ходе подобных сравнительных тестов следует оценивать не собственно возможность сверлить, которая является первым и очевидным условием работоспособности инструмента, а соответствие полученных отверстий требованиям по всем критически важным для данного технологического процесса параметрам, если только серия годных отверстий не прерывается по причине излома сверла.

На практике технология производства печатных плат, в особенности высокоточных, с использованием микроразмерных сверл не допускает их эксплуатацию до излома. Микроразмерные сверла (диаметра 0,3 мм и менее) отправляются на переточку либо утилизируются после формирования примерно 1000 отверстий [22], что обеспечивает с допустимой вероятностью отсутствие поломок и приемлемое качество отверстий. Таким образом, результаты сравнительных тестов, в которых сверла с покрытием обеспечивают сверление большего числа отверстий, чем сверла без покрытия, можно было бы трактовать как снижение доли брака от поломки инструмента, но не как обеспечение большего ресурса сверла. Второе утверждение требует дополнительного анализа параметров качества полученных отверстий.

Другой существенный недостаток информации, полученной от производителя, — отсутствие данных о ее точности и достоверности. Часто предлагаемые сравнительные характеристики становятся результатами единичных испытаний, что не позволяет статистически охарактеризовать данные наблюдения. Это особенно важно, когда в ходе подобных тестов результаты применения различных инструментов значительно различаются и фактически оказываются не сопоставимыми между собой [19].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предоставляемая производителем инфор-

¹ Подтверждение верности приведенных выше рассуждений можно проследить, если описать исходную ситуацию, используя термины надежности [17] — работоспособная и неработоспособная техническая система, а также виды отказов технической системы: функциональный, параметрический, по параметрам продукции, по производительности. Для наглядности приведем один из них: «Неработоспособное состояние технологической системы — состояние технологической системы, при котором значение хотя бы одного параметра и (или) показателя качества изготавливаемой продукции, производительности, материальных и стоимостных затрат на изготовление продукции не соответствует требованиям, установленным в нормативно-технической и (или) конструкторской и технологической документации».

мация, в которой сообщается о свойствах его инструмента или покрытия, часто не является полной и достоверной, а значит, становится непригодной для оценки экономической целесообразности выбора конкретного предложения. Парадоксальность такого вывода заключается в том, что сведения о потребительских свойствах режущего инструмента или покрытия могут быть востребованы в кругу лиц, непосредственно эксплуатирующих данную продукцию в промышленном производстве и, соответственно, знакомых с ее реальными показателями качества.

Одним из решений проблемы низкого качества информационных материалов является использование существующих в научно-технической практике стандартов на проведение экспериментальных исследований, сертифицированных методик определения характеристик режущего инструмента, максимально приближенных к производственным условиям применения. В случае, когда выполнение исследования по существующей сертифицированной методике по каким-либо причинам невозможно или нецелесообразно, вполне допустимо определение отдельных показателей качества инструмента. Однако если данных показателей недостаточно для установления значения какой-либо интегральной характеристики, как, например, ресурс службы инструмента, то упоминание о ней в информационных материалах является необоснованным, и более того, с точки зрения объективности в ходе проведения исследований — неэтичным [23].

Использование научного подхода к получению информации о характеристиках изделий

Для того чтобы информация о свойствах инструмента действительно стала востребованной, она должна быть достаточно полной для обеспечения возможности принятия обоснованного решения о наличии у предлагаемого инструмента конкурентного преимущества в рамках решения конкретной производственной задачи. Предоставить такую информацию может только сравнение объектов исследования (инструментов) по всем параметрам, определяющим их качество. Следует понимать, что не всегда обязательно проводить масштабные исследования для определения абсолютно всех параметров качества отверстий. Часто эти показатели можно определить с помощью нескольких технологических операций, и тогда характеристики будут выражены в бинарной форме («удовлетворяет» либо «не удовлетворяет» требованиям стандартов, применяемых в данной отрасли), но, тем не менее, совокупность полученных сведений должна полностью отражать работоспособность рассматриваемых сверл для решения указанной задачи.

Особо нужно отметить, что использование альтернативной технологии или инструмента в массовом производстве подразумевает наличие не только единичных примеров высоких показателей качества или надежности, но и повторяемости данных результатов, и это

необходимо учитывать при планировании эксперимента.

Таким образом, исследования, посвященные оценке показателей качества сверл, включая их ресурс, должны предусматривать следующие этапы:

1. Определение границы области допущения, на которую должен распространяться вывод об исследуемой характеристике объекта сравнения, например стойкость инструмента при обработке определенного класса материалов (при этом необходимо теоретически или практически обосновать возможность распространения выводов на всю указанную область, в данном случае — класс материалов).
2. Выбор совокупности значимых критериев (параметров качества), определяющих исследуемую характеристику объекта сравнения для всей области, выбранной в п. 1.
3. На основании результатов пп. 1 и 2 определить содержание экспериментальных исследований, их объем, произвести эксперимент. Весьма полезно при этом предварительно составить план эксперимента [24] и таким образом заранее представить себе необходимый объем исследований, а значит, спланировать материальные и временные затраты на проведение тестирования.
4. Анализ и статистическая обработка полученных данных — сформулировать выводы об исследуемой характеристике объектов сравнения с указанием величины полей допуска, значений достоверной вероятности либо сформулировать вывод в любой другой форме, которая может быть логически и статистически обоснованно использована при расчете целесообразности промышленного применения предлагаемого изделия/инструмента.

Пример использования предлагаемого подхода к реализации исследования ресурса микроразмерного инструмента для формирования переходных отверстий в печатной плате

Рассмотрим этот подход на примере. Предположим, нам необходимо оценить ресурс твердосплавных сверл диаметра 0,3 мм. Подразумевается, что производитель указал режимы работы данного инструмента и заявляет о значительном увеличении ресурса при сверлении многослойных печатных плат в материале FR4. То есть заранее определена область распространения выводов об увеличенном ресурсе: МПП из стеклотекстолитов марки FR4.

Поскольку отверстия диаметра 0,3 мм предназначены для формирования межсоединений, основным показателем качества всего технологического процесса их создания является проводимость (при конкретных условиях эксплуатации в течение заданного срока службы). Примем такой параметр основным показателем качества (Main Project Value, MPV) отверстий. Другими словами, годным будем считать то отверстие, которое позволяет обеспечить в рамках проводимого технологиче-

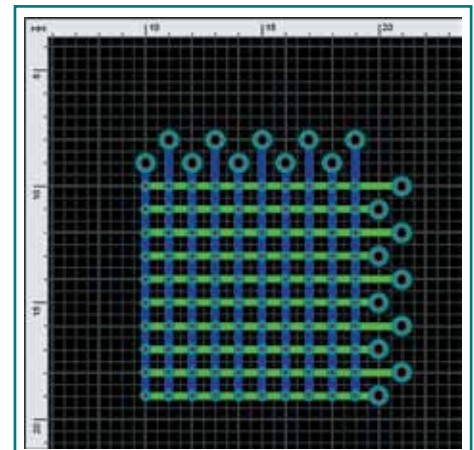


Рис. 1. Простейший вариант реализации тестовой платы для оценки проводимости межсоединений 10 пар взаимно ортогональных проводников для ДПП (выполнено в программе Sprint Layout 6.0)

ского процесса необходимую проводимость между всеми контактными слоями. Данное определение не следует трактовать излишне буквально, поскольку всегда согласно требованиям имеется возможность изменить условия проведения испытания, добавив, например, условие по сохранению спектра пропускаемого тест-сигнала и т. п.

Для того чтобы проверить проводимость между слоями, сформируем рисунок тестовой платы (рис. 1), позволяющий нам провести данную оценку.

Для реализации оценки проводимости межсоединений с внутренними слоями дополним плату (рис. 2) двумя взаимно ортогональными массивами проводников. Представленная плата с массивом 10×10 отверстий может быть легко масштабирована до нужного количества отверстий (рис. 3), которые необходимо выполнить для оценки ресурса инструмента. Однако опыт показывает, что использование большого числа относительно небольших массивов, например по 100 отверстий, предпочтительнее, поскольку для платы большого размера такой неразрушающий метод контроля, как исследование поверхности методом микроскопии, ввиду габаритных ограничений на образец может потребовать нарушения целостности платы (удаление интересующего участка). Поэтому при проектировании тестовых образцов следует заранее учесть ограничения, накладываемые предусмотренными методами исследования.

Для вывода контактных проводников из внутренних слоев требуются металлизированные отверстия такого диаметра, которые при данной технологии обеспечивают процент выхода годных отверстий, близкий к 100% (на представленном изображении платы они выполнены диаметром 0,6 мм). То же касается ширины пояса и проводников, на изображении платы ширина проводников — 0,3 мм, ширина пояса контактной площадки внутреннего слоя — 0,1 мм (при такой топологии имеется возможность для ее увеличения), ширина пояса контактной площадки наружных слоев — 0,15 мм. Иными словами, рисунок платы следует формировать так, чтобы

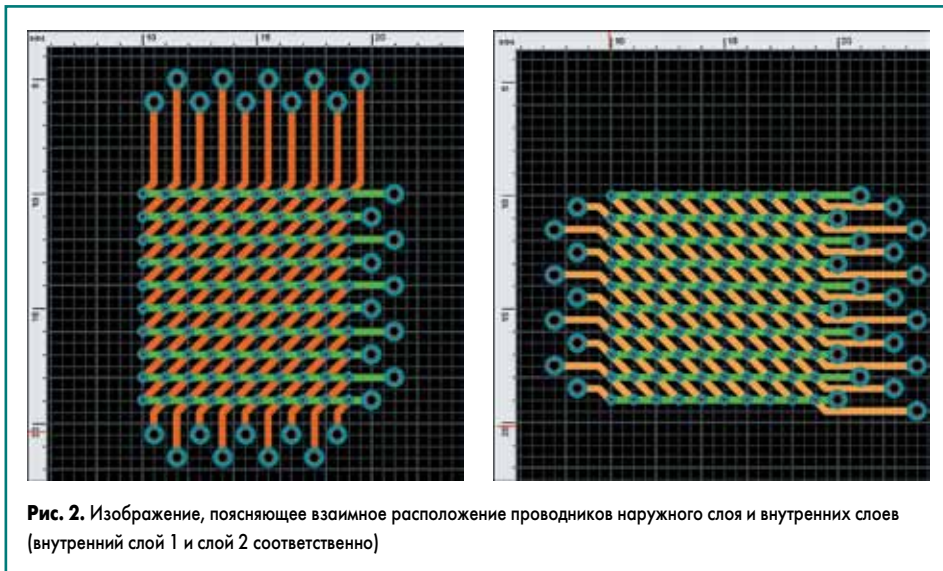


Рис. 2. Изображение, поясняющее взаимное расположение проводников наружного слоя и внутренних слоев (внутренний слой 1 и слой 2 соответственно)

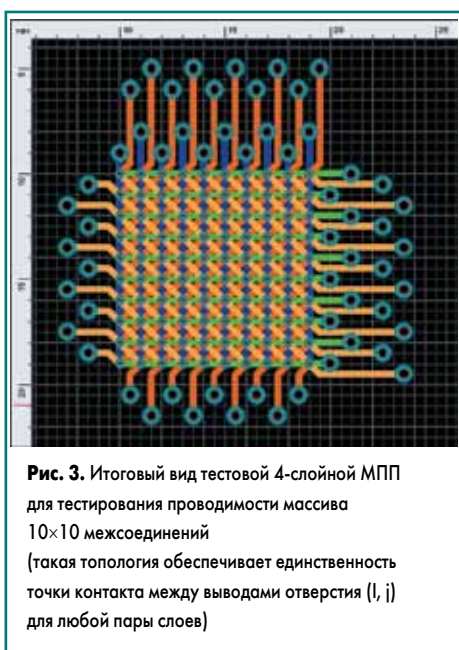


Рис. 3. Итоговый вид тестовой 4-слойной МПП для тестирования проводимости массива 10×10 межсоединений (такая топология обеспечивает единственность точки контакта между выводами отверстия (i, j) для любой пары слоев)

единственным узким местом (bottleneck — «бутылочным горлышком», «ограничивающим фактором») в технологическом процессе являлся исследуемый параметр, в данном случае — качество поверхности отверстия диаметра 0,3 мм. Делая этот вывод, мы допускаем также, что технологический процесс металлизации отверстий диаметра 0,3 мм в платах заданной толщины (например, 1 мм) из стеклотекстолита марки FR4 на данном предприятии освоен и выпуск годных металлизированных отверстий с помощью технологии сверления и подготовки отверстий к металлизации близок к 100%.

Данная плата должна быть изготовлена в соответствии со всеми этапами производства, которые обеспечат возможность ее функционирования (тестирования) согласно топологии: формирование рисунка проводников, прессование пакета, сверление, подготовка отверстий под металлизацию, металлизация. После проведения указанных технологических операций следует проверить проводимость межсоединений.

Для того чтобы минимизировать затраты на исследование, после проверки проводимости имеет смысл изготовить микрошлифы отверстий того ряда, в котором был обнаружен первый отказ, а также нескольких предыдущих и последующих рядов отверстий. Анализ данных микрошлифов методом микроскопии позволит выявить фактор, послуживший причиной отказа (нарушения проводимости), и проследить его развитие по мере износа инструмента. Кроме того, можно будет судить, стал ли отказ случайным или возник из-за постепенного снижения качества формируемых отверстий в результате износа инструмента, и определить те параметры качества отверстий, которые деградируют в связи с износом инструмента.

Для определения конкретного значения стойкости инструмента следует выбрать параметр, позволяющий локализовать отказ сверла. В данном случае это количество отверстий, сформированных данным сверлом до того отверстия, чья проводимость слоя металлизации оказалась недостаточной.

Обеспечить достоверность сведений, полученных в ходе эксперимента, поможет создание некоторой выборки инструмента (n шт.). Последующий расчет параметров, характеризующих распределение значений ресурса инструмента для данной выборки, позволит судить о достоверности имеющихся результатов и сделать вывод о фактической стойкости испытанного инструмента. Для этого необходимо рассчитать среднее значение стойкости сверл и гамма-процентный ресурс.

Математическая обработка результатов испытаний

Средняя стойкость сверл для рассмотренной выборки рассчитывается по формуле:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n},$$

где T_i — время работы до отказа каждого сверла, количество отверстий; n — количество сверл, для которых проводились испытания.

Среднеквадратическое отклонение значения стойкости подсчитывается по формуле:

$$\sigma(T) = \sqrt{\frac{\sum (T_i - \bar{T})^2}{n-1}}.$$

Коэффициент вариации стойкости рассчитывается по формуле:

$$Var(T) = \sigma(T)/T.$$

Значение коэффициента вариации позволяет оценить повторяемость определенных значений стойкости (чем ниже повторяемость результатов испытаний, тем больше коэффициент вариации, повторяемость следует считать удовлетворительной при коэффициенте вариации не более 0,3).

Оценить² гамма-процентный ресурс, или стойкость, с заданной вероятностью (согласно ГОСТ 27.002-89 гамма-процентный ресурс — это наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов) позволяет следующее выражение:

$$T_p = \bar{T} \times (1 - K_p \times Var(T)),$$

где K_p — квантиль нормального распределения для заданной вероятности p (для $p = 0,9$ $K_{0,9} = 1,282$, для $p = 0,95$ $K_{0,95} = 1,645$).

Выводы

Использование предложенного подхода к осуществлению испытаний и последующему предоставлению информации потребителю поможет производителю микроразмерных сверл точнее прогнозировать и обеспечивать более высокое качество выпускаемого инструмента. Кроме того, данный подход будет полезен для анализа направлений развития и определения параметров инструмента, требующих улучшения в первую очередь, поскольку обеспечивает постоянный мониторинг характеристик продукции в сопоставлении с требованиями отрасли. Данная особенность позволит выявить узкий сегмент рынка, в котором конкурентные преимущества продукции будут иметь решающее значение.

В заключение хотелось бы отразить еще одну мысль: «Cui bono?»³. Производителю невыгодно, по понятным причинам, выпускать инструменты с высоким ресурсом (в пределе своем вечные). Какую же пользу могут принести упрочняющие покрытия на микроразмерных сверлах, чтоб это стало выгодно производителям инструмента и печатных плат? Для ответа на этот вопрос следует взглянуть на ситуацию более широко и попытаться найти те технологические проблемы, в борьбе с которыми производитель инструмента и производитель печатных плат были бы союзниками:

- Существует необходимость обработки новых, труднообрабатываемых материалов.

² В общем случае расчет гамма-процентного ресурса по статистическим данным осуществляется намного более сложным образом [25].

³ Cui bono (лат.) — кому выгодно.

Упрочняющие твердосмазывающие покрытия могут обеспечить применение традиционных инструментов для обработки труднообрабатываемых материалов или материалов, чья обработка имеет особенности.

- Требуется сократить временные издержки на производство. Инструменты с покрытием могут снизить стоимость машинного времени за счет реализации более производительной обработки.
- Появляется потребность в уникальных свойствах инструмента. Обеспечить особые свойства инструмента за счет их усиления «второстепенными» качествами покрытий для использования в узких нишах технологии производства печатных плат. Например, покрытие снижает коэффициент трения и упрощает извлечение стружки, а также несколько увеличивает жесткость сверла на изгиб [26]. Сочетание этих свойств покрытий не является основным, но, возможно, оно позволит создать специальные микроразмерные сверла с еще большим соотношением глубины сверла к диаметру или сверла для сверхпрецизионного сверления.

Таким образом, освоение технологии упрочнения твердосплавных микроразмерных сверл для печатных плат за счет использования твердосмазочных покрытий является перспективным техническим решением, однако успешность его внедрения во многом зависит от аккуратности производителя при выборе подхода к реализации и оценки эффективности его применения.

Литература

1. С. Г. Мелихов. Метод нанесения упрочняющих покрытий // Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет) кафедра «Технологические системы электроники». Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. 2004. <http://www.twirpx.com/file/446814/>
2. Каталог микроразмерных сверл компании Dormer — [http://www.dormertools.com/Sandvik/2531/internet/S003592.nsf/alldocs/64706E8CEB14748CC1257818003741DD/\\$file/micro201102usa-en.pdf](http://www.dormertools.com/Sandvik/2531/internet/S003592.nsf/alldocs/64706E8CEB14748CC1257818003741DD/$file/micro201102usa-en.pdf)
3. Свойства покрытий Platit — <http://platit.com/coatings/coating-specifications>
4. Свойства покрытий Balzers — <http://www.oerlikon.com/balzers/en/products-services/balinit-coatings/>
5. CemeCon FACTS customer magazine for coating technology № 25, 2005 — www.cemecon-de.com.cn/
6. Novel Coating Materials Heighten Performance of Drills? Routers, TPCA show2009 highlight materials — http://creepservice.com/uploads/200910ulf_coat_e.pdf
7. А. Ю. Терентьев. PVD-покрытия режущих кромок инструмента: высокие режимы и сокращение времени обработки // «Оборудование и инструмент для профессионалов». Серия «Металлообработка». № 3. 2012.
8. Union Tool new Technics Improve Tool Performance, Technology Highlight, AEI 2009. — http://creepservice.com/uploads/200912ulf_coat2_e.pdf
9. Н. У. Ueng, Т. С. Т. Guo, К.-Н. Dittrich. Development of a hybrid coating process for deposition of diamond-like carbon films on microdrills // Surface & Coatings Technology 200 (2006) 2900–2908 — http://www.roth-rau.de/datenbanken_de/photovoltaic/11729348751.pdf
10. Каталог покрытий компании Balzers (на страницах с подробным описанием покрытий указывается использование на инструменте для обработки композиционных материалов следующих покрытий: Triton, Micran, Hard Carbon, Diamond Plus) — <http://www.oerlikon.com/balzers/en/products-services/balinit-coatings/>
11. «Упрочнение режущего инструмента, штамповой и литейной оснастки, упрочнение мелкоразмерных твердосплавных сверл, фрез, волок и калибров» — информационный листок об услугах компании «Перспективные технологии и материалы от научной лаборатории ЭТИПА» — http://www.iofran.ru/10_2.htm
12. «HARTNER Micro-precision drills without oil feed» — каталог микроразмерных сверл производства компании Hartner 2013.
13. Каталог сверл компании Mitsubishi Carbide — http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mhg/enuk/html/product/product_guide/information/drilling/pdf/drill_selection_chart.pdf
14. <http://www.uniontool.com/cgi-bin/catalogue/PCB/Catalogue%20PCB%202014/#/17/zoomed>
15. Толковый словарь Ушакова, определение термина «сверление» — http://slovarik-ushakov.info/Словарь_Ушакова/68214/Сверление
16. Ильин В. А. Технология изготовления печатных плат // Машиностроение (серия «Библиотека гальванотехника» / Под ред. П. М. Вячеслава; вып. 9). 1984. <http://solex2108.narod.ru/tipp1.htm>
17. ГОСТ 27.004-85 — «Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения».
18. Результаты сравнительного теста по оценке увеличения ресурса микроразмерного инструмента с покрытием компании Creepservice и покрытием другого производителя <http://www.creepservice.com/index.php?lang=en>
19. Результаты сравнительного теста по определению ресурса сверл MINI STAR от производителя Mitsubishi Carbide и сверл другого производителя — <http://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/b/b052a.pdf>
20. Сравнительный тест по оценке на стойкость к износу, критерий оценки ресурса сверла — нахождение значения величины диаметра в поле допуска — <http://platit.com/coatings/coating-applications/nanostructured-coating-drilling?page=0%2C1>
21. Отчет о результатах ресурсных испытаний сверл Union Tool с покрытием от компании Creepservice. Drilling trials (07.12.2006) Juan Jose Castro Alonso Union Tool Europe S. A. — <http://innoprod.startbase.ru/download.html?file=file/3722106&title=UT-tests+official+at+Posalux.PDF>
22. Типовые параметры сверления для сверл HAM PRAZISION — <http://www.sip-s.ru/ham2/gr9-22.html>
23. Николас Х. Стенек. Ответственный подход к проведению научных исследований // Вводный курс отдела этики научных исследований. 2003. — <http://www.bioethics.ru/Images/Catalog/154-1-33.pdf>
24. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных // Л.: Судостроение. 1980.
25. Л. В. Ефремов. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий // М.: Наука. 2008.
26. Flexion tests, micro drill of 0.1mm diameter — <http://www.creepservice.com/index.php?lang=en>