

Платы печатные. Сверление микроотверстий

Что представляет собой современное высокоточное сверлильное оборудование для производства печатных плат? Можно ли назвать его вершиной эволюции механического формирования отверстий под металлизацию или это лишь еще один шаг в развитии?

Михаил Однодворцев

mikle@elserv.ru

Современное электронное оборудование, в особенности мобильное, имеет электронную начинку минимально возможных размеров и веса. Таковы, например, ноутбуки, КПК, GPS, телефоны, беспроводная связь. Увеличение плотности проводников и монтажных выводов на печатной плате, уменьшение ширины проводников и зазоров между ними обусловлено применением малогабаритных элементов (рис. 1) со множест-



Рис. 1. Малогабаритные элементы на печатной плате и внешний вид МПП

Таблица. Параметры многослойной конструкции

Наименование параметра	Минимальный размер, мм			
	Сегодня	Завтра	Послезавтра	
A	Ширина проводника на внешней поверхности	0,1	0,075	0,05
B	Зазор на внешней поверхности	0,1	0,085	0,062
C	Ширина проводника на внутреннем слое	0,1	0,075	0,025
D	Зазор на внутреннем слое	0,1	0,085	0,062
E	Диаметр глухого отверстия	0,1	0,075	0,025
F	Контактная площадка основания глухого отверстия	0,25	0,2	0,05
G	Контактная площадка входа глухого отверстия	0,3	0,25	0,05
H	Диаметр сверления сквозного отверстия	0,25	0,2	0,2
I	Контактные площадки сквозного отверстия	0,55	0,5	0,4
J	Отношение глубины к диаметру глухого отверстия	≤3:1	≤3:1	≤3:1
K	Диаметр верхнего глухого отверстия	0,175	0,15	0,075
L	Диаметр нижнего глухого отверстия	0,1	0,075	0,025
M	Глубина металлизированного слепого отверстия	0,2	0,15	0,1
N	Диаметр сверления слепого отверстия	0,25	0,2	0,2
O	Контактные площадки слепого отверстия	0,55	0,5	0,4
P	Контактная площадка верхнего глухого отверстия	0,375	0,325	0,25

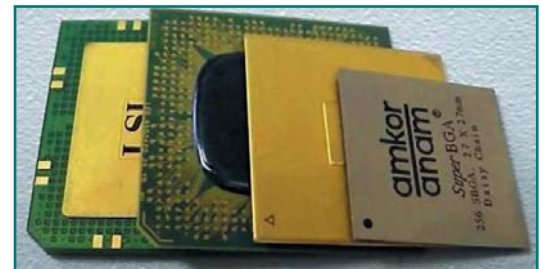


Рис. 2. BGA, MKM, Flip-Chip и другие элементы

вом выводов, таких как BGA, многокристальные модули (МКМ), флип-чипы (Flip-Chip) и т. д. (рис. 2). Общая тенденция к миниатюризации и снижению веса изделий приводит к созданию многослойных структур печатных плат (рис. 3), имеющих огромное количество различных типов межслойных переходов, сформированных разнообразными методами. В таблице приведены существующие на сегодняшний день параметры многослойной конструкции и перспективные разработки, возможные в будущем.

Физические размеры минимальных отверстий, полученных на современных сверлильных станках, сравнимы с размерами отверстий, сделанных на установках лазерного сверления. Например, на сверлильных станках Ultraspeed Lightning фирмы Posalux (Швейцария) (рис. 4), оснащенных высокоскоростными шпинделями PS 300, минимальный заявленный диаметр сверления составляет 50 мкм (0,05 мм).

Вообще, сравнение сверлильных станков и установок лазерного сверления — некорректно, поскольку данные типы технологического оборудова-

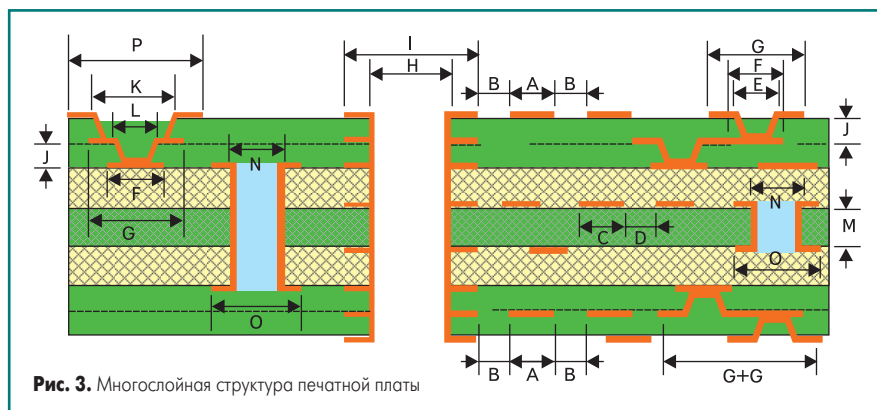


Рис. 3. Многослойная структура печатной платы



Рис. 4. Сверлильный станок Posalux Ultraspeed Lightning

ния предназначены для решения различных задач, хотя эти задачи иногда пересекаются и возникает необходимость использования обоих видов оборудования в едином производственном цикле. Кстати, еще одним способом получения микроотверстий является травление.

Хотелось бы отметить, что установки лазерного сверления, как правило, используются для высокопроизводительного формирования значительного количества глухих отверстий (до 400 отверстий в секунду) небольшой глубины (не более 1:3) диаметром 100–300 мкм (рис. 5). Подобное ограничение глубины связано с особенностями процесса «лазерного сверления».

Актуально использование лазерного сверления для гибких печатных плат, основу которых составляет полиимид, фторопласт, их варианты с армированием или другие экзотические материалы, плохо поддающиеся механическому сверлению без «задигов», «выровов» или вытягивания материала. Применение различных типов лазера для медной фольги и диэлектрика, а также процесс подготовки сформированного лазером отверстия (рис. 6), состоящий из нескольких этапов, делает технологию лазерного сверления сложной и узкоприменимой.

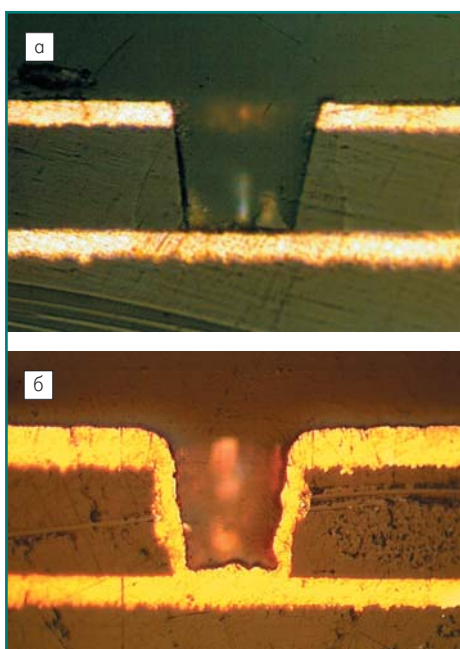


Рис. 5. а) идеально подготовленное отверстие и б) металлизированное отверстие, просверленное лазером

Операции формирования микроотверстия

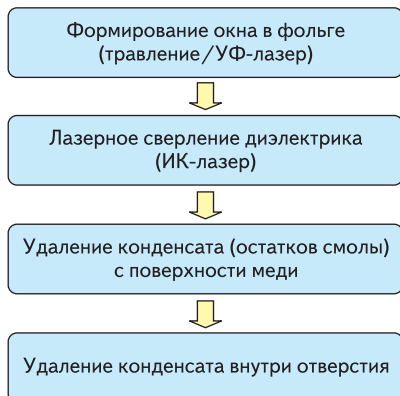


Рис. 6. Последовательность операций формирования микроотверстий лазером

Следует еще раз подчеркнуть, что лазерное сверление не является альтернативой для механического сверления, а представляет собой отдельный технологический процесс, предназначенный для отдельных типов и конструкций печатных плат. Более подробно особенности лазерного сверления и его применение мы рассмотрим в другой статье.

Для получения отверстий под металлизацию основной массы многослойных печатных плат, в том числе гибко-жестких и гибких, используются сверлильно-фрезерные станки. Для формирования глухих отверстий в этих станках применяется контактное сверление (рис. 7).

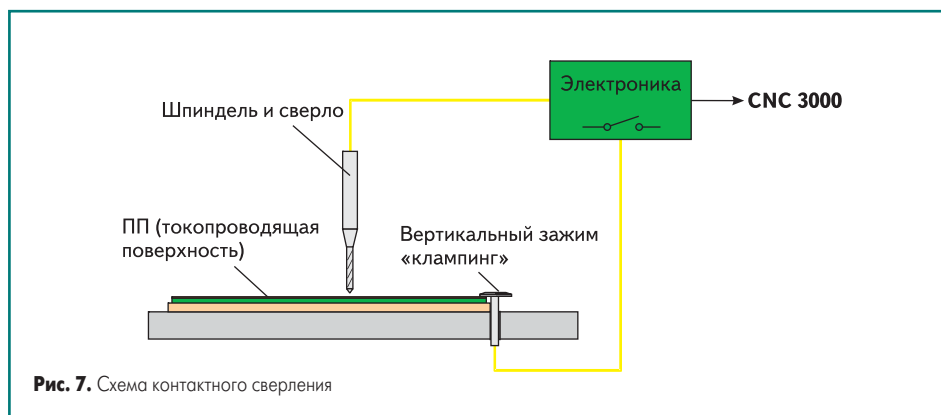


Рис. 7. Схема контактного сверления

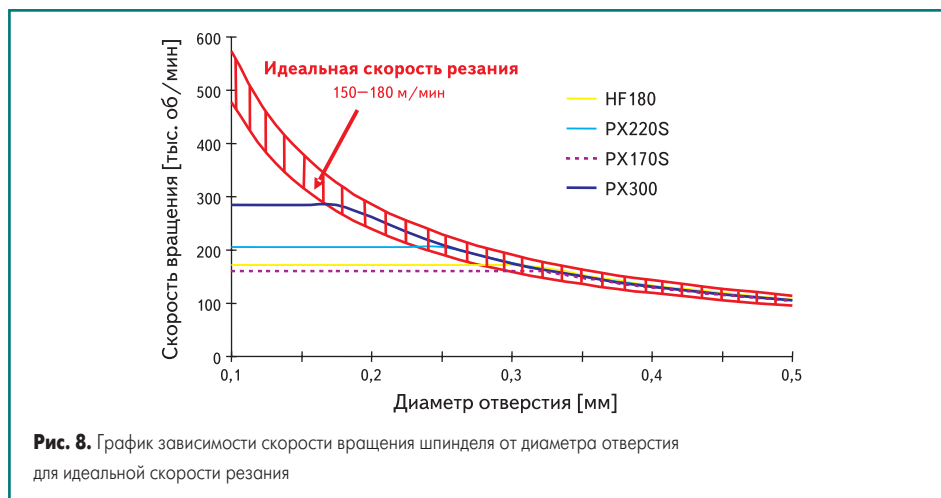


Рис. 8. График зависимости скорости вращения шпинделя от диаметра отверстия для идеальной скорости резания

Заявленная производительность каждого шпинделя современных станков — до 4 отверстий в секунду, но режимы резания материала твердосплавным инструментом накладывают свои ограничения (рис. 8). К примеру, для многослойной печатной платы 5-го класса, имеющей переходные отверстия диаметром 0,2 мм, составляющие более 70% от всех отверстий на плате, реальная производительность на асинхронном шпинделе HF125 снижается до 2 отверстий в секунду. Такая печатная плата имеет порядка 500 отверстий на 1 дм². Производительность одного шпинделя без учета межоперационного времени для многослойной печатной платы 5-го класса составляет в среднем 0,15 м²/час.

Для увеличения производительности сверлильно-фрезерных станков применяются различные технические и технологические решения. Так, фирма Posalux на своих сверлильно-фрезерных станках серии Ultraspeed для повышения производительности использует следующее:

1. Линейный привод по осям X, Y и Z (стандартная комплектация) и функция «скоростного сверления»

Отсутствие трения в линейных приводах позволяет добиваться высокой скорости перемещения и ускорения (рис. 9 и 10).

Оси	X	Y (стол)	Z
Скорость	60 м/мин	75 м/мин	30 м/мин
Ускорение	до 4 г (40 м/с ²)	до 1,5 г (15 м/с ²)	до 8 г (80 м/с ²)

Точность позиционирования станка по осям X и Y составляет ±5 мкм
Повторяемость ±2 мкм



Рис. 9. Внешний вид линейных приводов по осям X, Y, Z

Линейный привод по оси Z и система линейного измерения с помощью контактного сверления позволяют сверлить глухие отверстия с точностью заглубления 10 мкм (рис. 11). Функция скоростного сверления для заданной области (не включающей область расположения боковых прижимов и штифтов заготовки) сокращает время перемещения инструмента над заготовкой и время сверления от 3 до 7%, в зависимости от насыщенности

отверстий. Необходимое условие для использования этой функции — наличие в станке функции контактного сверления.
 2. Синхронные шпиндели
 Это одна из последних разработок. Синхронные шпиндели PX-170 (8–170 тыс. об/мин), PX-220 (15–220 тыс. об/мин) и PX-300 (25–300 тыс. об/мин) (рис. 12) имеют постоянную величину крутящего момента (рис. 13) и позволяют получить идеальные режимы ре-



Рис. 11. а) глухое отверстие под электронным микроскопом; б) группа металлизированных отверстий, просверленных на разную глубину станком Posalux

зания для разных диапазонов (рис. 14), тем самым сокращая время сверления. Идеальные режимы резания с помощью шпинделей серии PX позволяют увеличить срок службы инструмента до 4 раз (рис. 15). Кроме того, в себестоимости печатных плат затраты на инструмент составляют от 6% для ДПП до 46% для МПП 6–8 слоев с микропереходами (рис. 16), то очевидно и снижение стоимости самой печатной платы при работе на шпинделях указанной серии.
 3. Конвейерная система смены инструмента и контроль инструмента в реальном времени
 Вместо кассет с евромагазинами (рис. 17) сверлильно-фрезерные станки оснащаются конвейерной системой смены инструмента

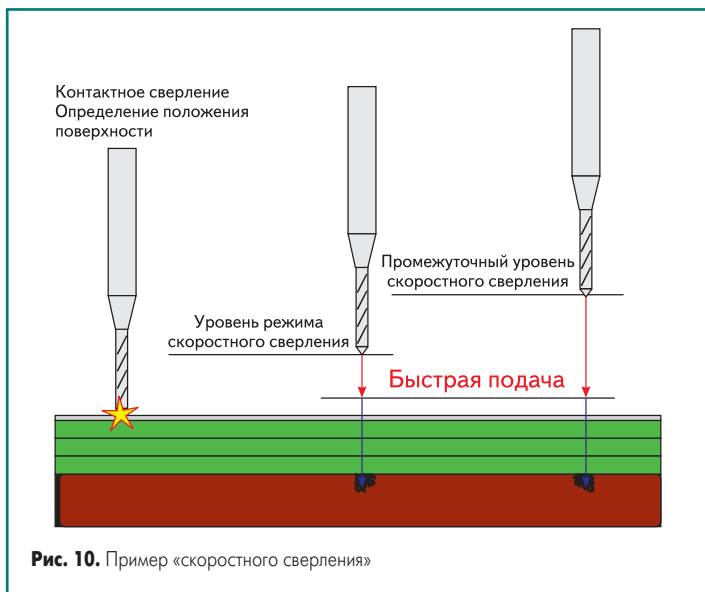


Рис. 10. Пример «скоростного сверления»

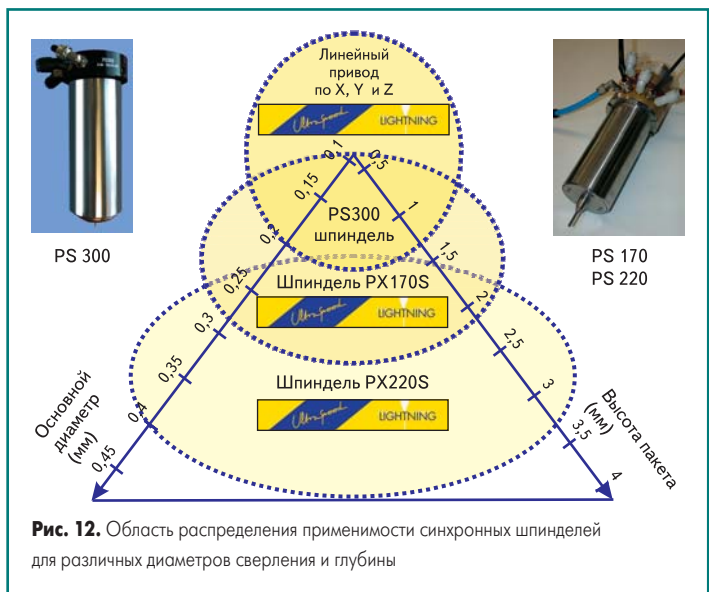


Рис. 12. Область распределения применимости синхронных шпинделей для различных диаметров сверления и глубины

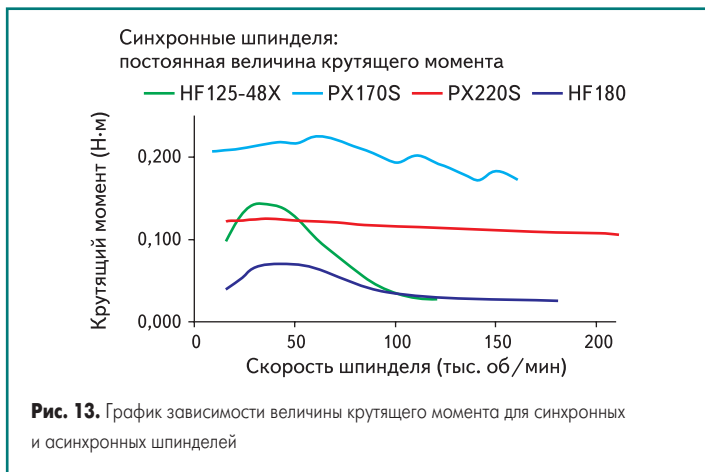


Рис. 13. График зависимости величины крутящего момента для синхронных и асинхронных шпинделей

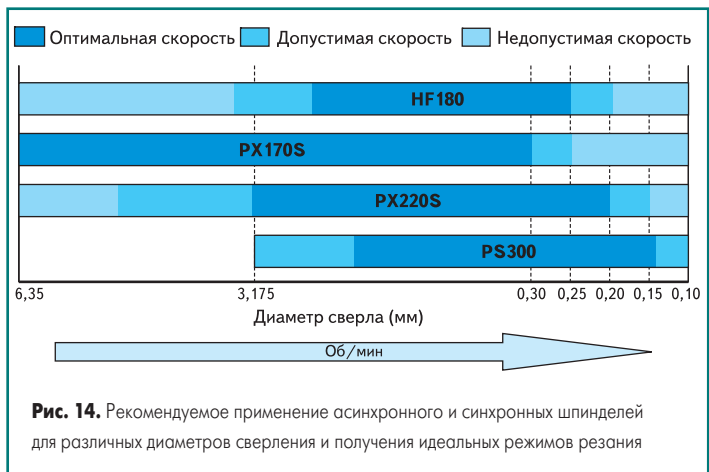


Рис. 14. Рекомендуемое применение асинхронного и синхронных шпинделей для различных диаметров сверления и получения идеальных режимов резания

	Новый инструмент	Синхронный шпиндель	Асинхронный шпиндель
Ø 6,35 мм • PX170S (8 000 об/мин) = 3000 отв. • HF180 (20 000 об/мин) = 750 отв.			
Ø 5,00 мм • PX170S (10 000 об/мин) = 4600 отв. • HF180 (20 000 об/мин) = 1000 отв.			
Ø 4,00 мм • PX170S (12 000 об/мин) = 5200 отв. • HF180 (20 000 об/мин) = 1000 отв.			

Рис. 15. Пример различного износа режущей кромки сверл при сверлении на синхронном и асинхронном шпинделе

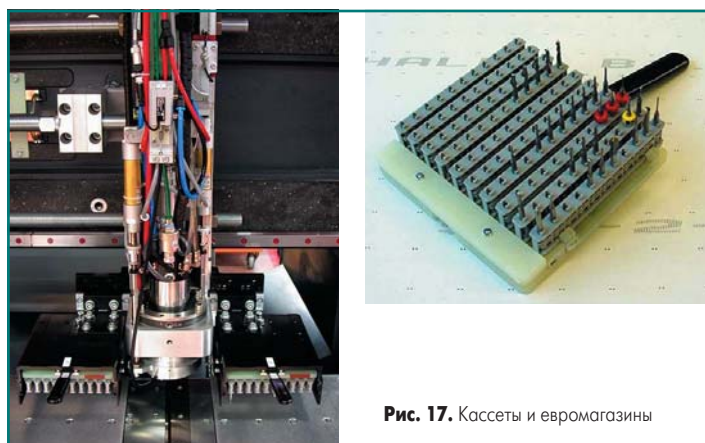


Рис. 17. Кассеты и евромагазины



Рис. 18. Конвейерная система смены инструмента и система загрузки/разгрузки евромагазинов

(рис. 18), что позволяет производить замену евромагазинов с инструментом в процессе работы (сверления/фрезерования), не увеличивая межоперационное время. Программное обеспечение предоставляет возможность программировать (назначать) каждой позиции евромагазина и позиции в евромагазине свои параметры, что облегчает работу с инструментарием.

Конвейерная система имеет два манипулятора для смены инструмента, сокращающие межоперационное время.

Система смены инструмента оснащена устройством лазерного измерения инструмента (рис. 19), благодаря чему можно работать с инструментом без упорных ограничительных колец, а также измерять длину, диаметр

и биение инструмента, не допуская использования для сверления или фрезерования инструмента не соответствующей длины, диаметра и биения (в соответствии с установленными допусками на данные параметры).

Система лазерного контроля инструмента в реальном времени (рис. 20) позволяет не пропустить момент поломки инструмента, вовремя заменить поврежденный инструмент новым и продолжить работу станка. Система также способна определить поломку одного из перьев режущего инструмента, соответственно, таким образом удается избежать получения бракованных отверстий и пазов.

Обе системы значительно сокращают время изготовления печатной платы, не допустив брака и исключив «человеческий фактор».

Прямые затраты на производство ДПП и МПП

Общий объем производства плат 15 000 м²
 Объем производства ДПП 10 500 м²
 Объем производства МПП 3000 м²

Составляющие затрат себестоимости за дм ²		ДПП	МПП
1	Расходы на химию	0,1843	0,2090
2	Базовые материалы	0,2499	0,4602
3	Фотошаблоны	0,0015	0,0053
4	Фотолитография	0,2318	0,3071
5	Инструмент	0,0485	1,0938
6	Холодная вода	0,0038	0,0132
7	Горячая вода для промывки	0,0129	0,0450
8	Электроэнергия	0,0526	0,1840
9	Трудозатраты	0,0911	0,0260
Итого прямых затрат, \$ за дм ²		0,88	2,34

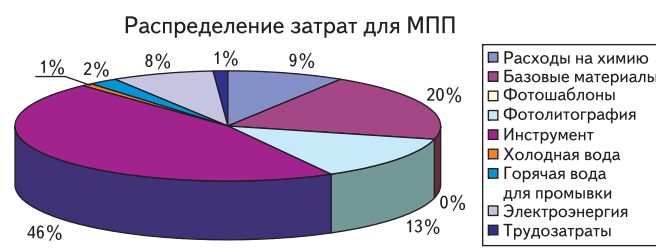
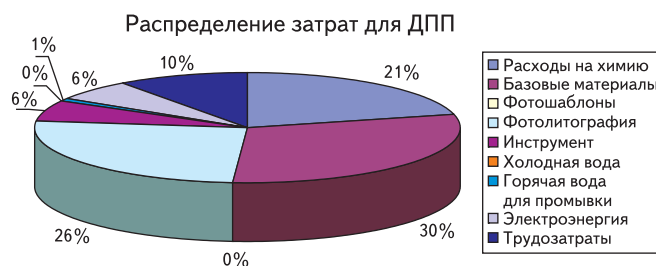


Рис. 16. Распределение затрат на производство ДПП и МПП

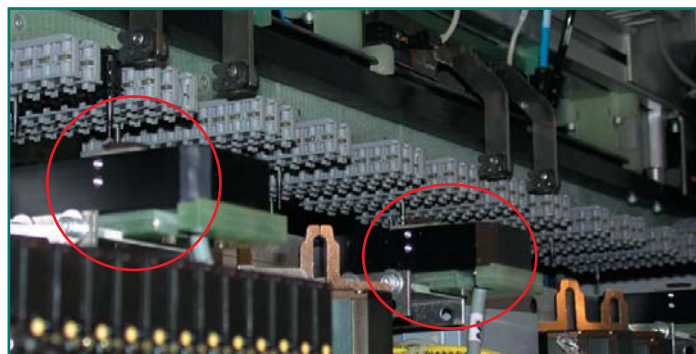


Рис. 19. Система лазерного измерения инструмента для каждого шпинделя



Рис. 20. Система лазерного контроля инструмента в реальном времени



Рис. 21. Автоматический загрузчик/разгрузчик с одиночным буфером



Рис. 22. Автоматический загрузчик/разгрузчик с буфером на 9 или 18 позиций на каждую станцию

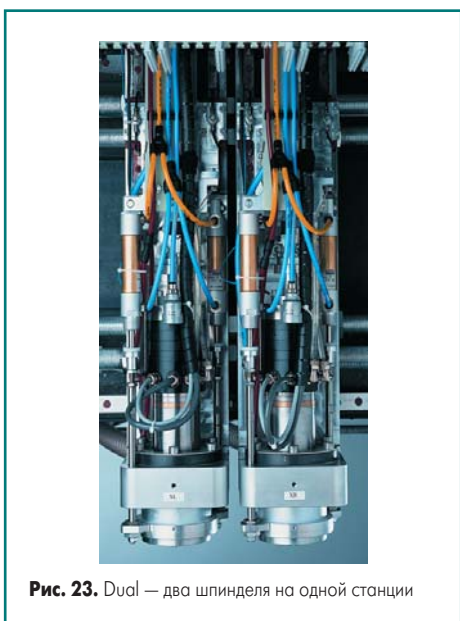


Рис. 23. Dual — два шпинделя на одной станции

4. Автоматическая загрузка/разгрузка заготовок

Существует два типа систем автоматизированной загрузки/разгрузки, предназначенных для сверлильно-фрезерных станков Ultraspeed.

Первый — это автоматический загрузчик/разгрузчик с одиночным буфером (рис. 21), позволяющий заранее подготовить следующую партию заготовок для обработки, не увеличивая таким образом межоперационное время.



Рис. 25. Сверлильный станок Posalux Ultraspeed MutiX



Рис. 24. Варианты распределения сверления одной заготовки между двумя шпинделями

Второй — это автоматический загрузчик/разгрузчик с буфером на 9 или 18 позиций (рис. 22). Каждый этаж может иметь запрограммированные различные рабочие задания, а идентификация заготовок может проводиться по штрихкоду.

5. Несколько шпинделей на одной станции

Вариант Dual (рис. 23). Два независимых по оси X шпинделя. Минимальное расстояние между шпинделями 143 мм. Этот вариант компоновки шпинделей на одной станции, в зависимости от расположения отверстий на плате, сокращает время цикла сверления в 1,5–2 раза по сравнению с одношпиндельным вариантом станций станков серии UltraSpeed. Каждый

шпиндель в варианте Dual обрабатывает половину рабочей площади стола (рис. 24).

Разместив на одной станции два различных шпинделя, можно получить универсальный сверлильный станок, способный сверлить как микроотверстия на одном шпинделе (например, PX 300 и PX 170), так и отверстия большого диаметра на другом шпинделе, с помощью идеальных режимов сверления (150–180 м/мин). Также использование двух различных шпинделей на одной станции предполагает создание сверлильно-фрезерного станка, который сверлит микроотверстия и фрезерует без последующей потери точности функции сверления микроотверстий.

Вариант (3X3, 4X3, ...) (рис. 25).

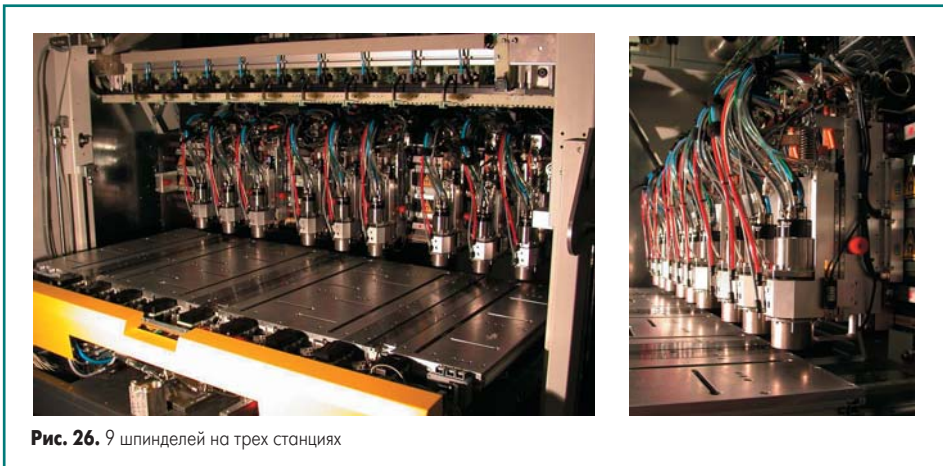
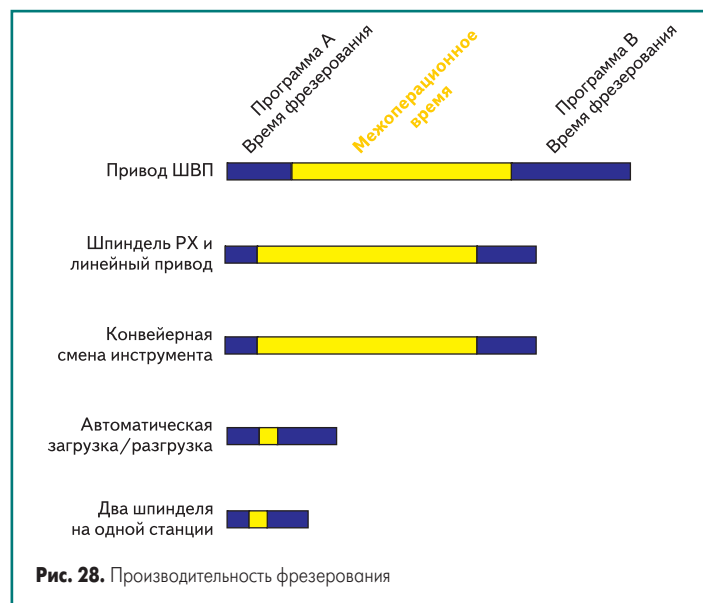
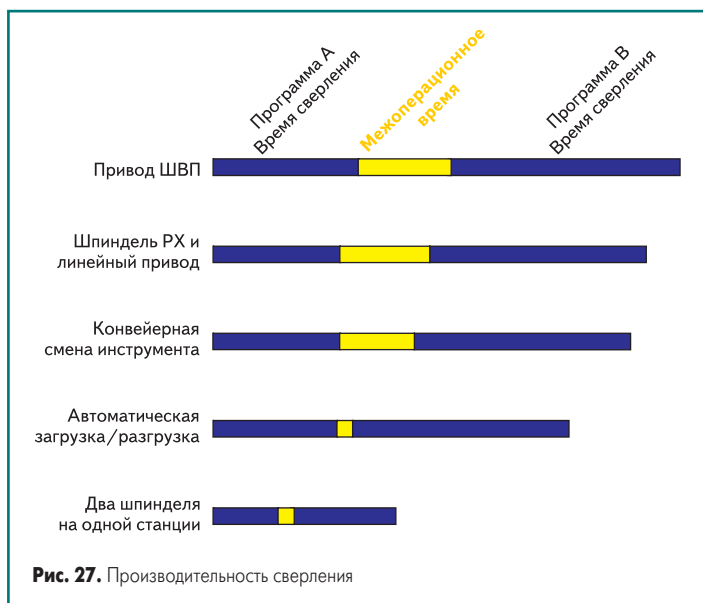


Рис. 26. 9 шпинделей на трех станциях



Три независимых по оси X шпинделя (рис. 26). Минимальное расстояние между шпинделями 110 мм. Этот «экзотический» вариант компоновки шпинделей на одной станции, в зависимости от расположения отверстий на плате, сокращает время цикла сверления в 2–3 раза по сравнению с одношпиндельным вариантом станций станков серии UltraSpeed. (Заявленная максимальная производительность такого станка с тремя шпинделями — 12 отверстий в секунду (на одной станции), то есть 720 отверстий в минуту. Если на таком станке просверлить печатную плату 5-го класса, рассмотренную в начале статьи, то реальная производительность одной станции может достигнуть 0,45 м²/час.)

Специальное программное обеспечение гарантирует сбалансированную работу шпинделей (двух или трех) на каждой станции и автоматически выбирает зоны сверления для каждого шпинделя, оптимизируя порядок сверления, путь перемещения и использование инструмента, тем самым определяя оптимальные расстояния между шпинделями и количество просверливаемых отверстий для каждого из них.

Все перечисленные технические или технологические решения, примененные фирмой Posalux для станков серии UltraSpeed, значительно увеличивают реальную производи-

тельность сверлильно-фрезерных станков в условиях серийного производства (рис. 27 и 28).

Однако в погоне за производительностью в фирме Posalux не забыли о точности оборудования и качестве получаемых отверстий. Особенности современных сверлильно-фрезерных станков UltraSpeed, с помощью которых выполняются высокоточные операции, достигается высокая точность и надежность, а также стабильность процесса обработки, являются следующие конструкционные и технологические решения:

1. *Основание станка и рабочий стол*

Основание станка (рис. 29) специально сконструировано для установки высокоскоростных линейных приводов. Основание изготовлено холодным литьем из специально подобранного материала, что обеспечивает отсутствие внутренних напряжений в жесткой конструкции. Такое основание сверлильно-фрезерного станка поглощает вибрации лучше, чем гранитное или стальное основание.

Рабочий стол (рис. 30) станка представляет собой слоеную конструкцию. Верхняя и нижняя плита стальная, а в середине гофрированный алюминий (алюминиевые соты). Подобная облегченная конструкция обеспечивает необходимую жесткость и позволяет добиться высоких значений ускорения (до 15 м/с²) при перемещении.

2. *Подбор материалов конструкции*

Для обеспечения точности станка необходимы материалы конструкции, имеющие одинаковый коэффициент расширения.

Основание станка = сталь	12 мкм °K-1 m-1
Стол (сталь)	12 мкм °K-1 m-1
Оси X, Y и Z в сборе (сталь)	12 мкм °K-1 m-1
Система позиционирования (сталь)	12 мкм °K-1 m-1
Линейная шкала измерения (сталь)	12 мкм °K-1 m-1

3. *Электромагнитная совместимость*

Использование в сверлильно-фрезерном станке сложной и различной электронной начинки обуславливает необходимость экранирования (рис. 31) различных узлов и блоков для обеспечения их изоляции от электромагнитных полей во избежание появления наведенных помех.

4. *Контактное сверление*

Это целая система, предназначенная как для увеличения производительности, так и для увеличения точности оборудования. Электроника системы контактного сверления

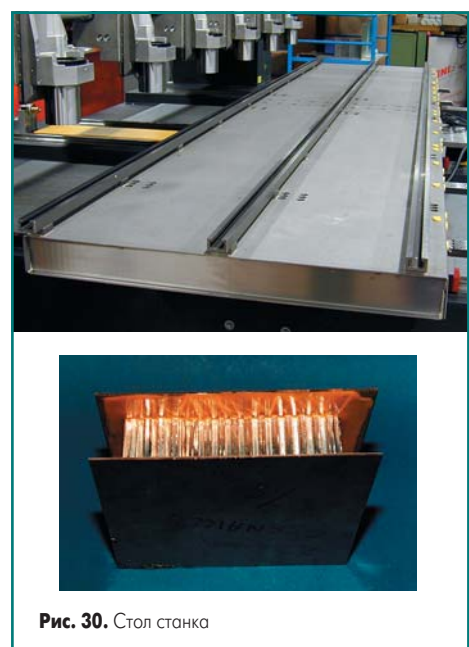




Рис. 31. Экранирование узлов

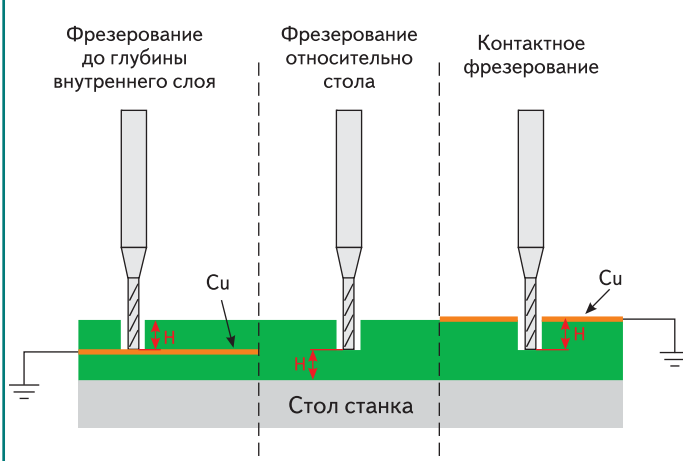


Рис. 32. Использование контактного сверления при фрезеровании

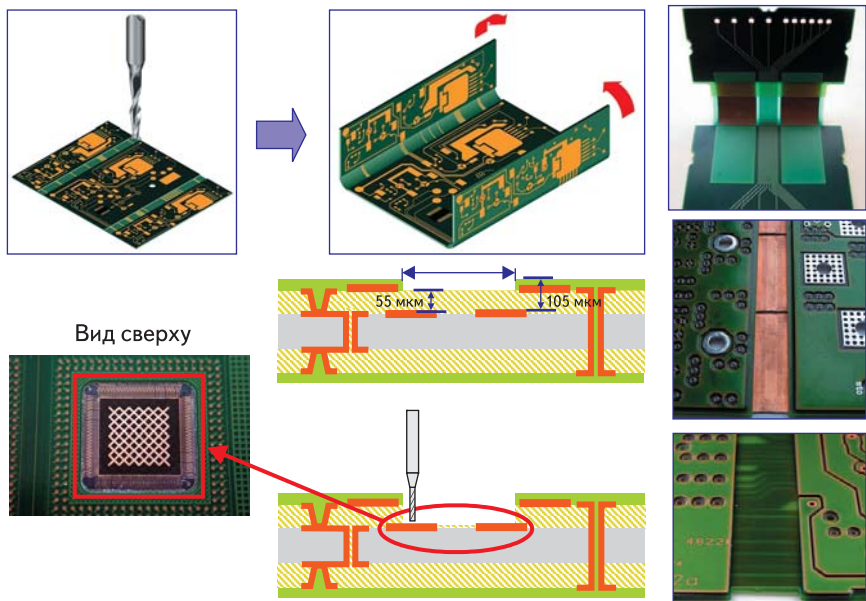


Рис. 33. Примеры применения контактного фрезерования

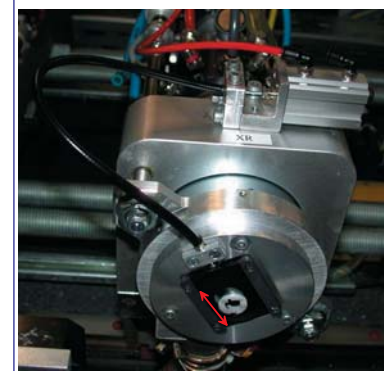
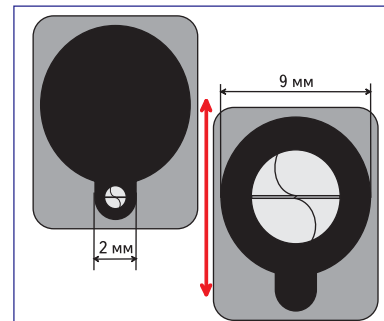


Рис. 35. Прижимная пята с изменяемой формой поверхности прижима

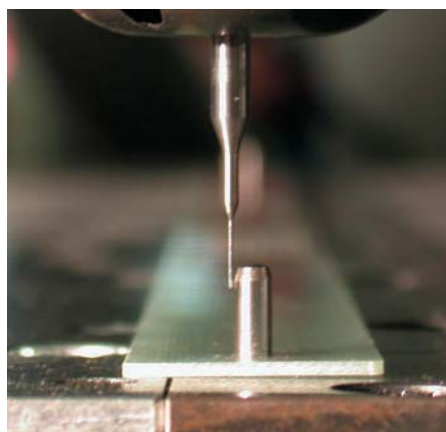
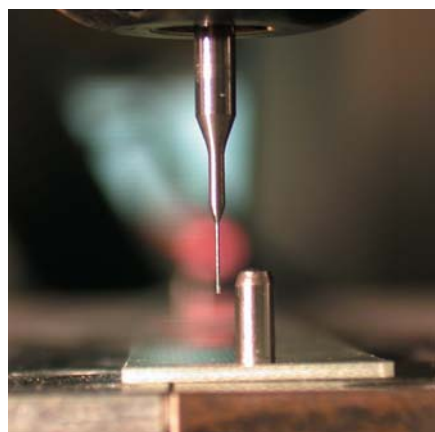


Рис. 34. Контроль положения шпинделя с помощью функции контактного сверления

определяет момент, когда кончик сверла должен коснуться поверхности заготовки печатной платы. Система контактного сверления используется для выполнения нескольких функций:

- определение поломки инструмента;
- скоростное сверление;
- скоростная предварительная подача по оси Z;

- фрезерование (рис. 32) с отсчетом глубины от поверхности стола, контактное фрезерование и его частный случай, а также фрезерование до глубины внутреннего слоя (рис. 33);
- сверление глухих отверстий;
- сверление сквозных отверстий (контроль глубины).

5. Система контроля точности

Система контактного сверления осуществляет быстрый контроль положения шпинделей относительно системы базирования (рис. 34). Также проводится контроль расположения двух или трех шпинделей относительно друг друга на одной станции. Точность измерения системы $\pm 5 \mu\text{m}$. Система



Рис. 36. Пример отверстия, просверленного с применением изменяемой прижимной пяты и обычной

отображает последние 20 результатов измерения, в том числе графически. Особенная конструкция крепления шпинделей на станции позволяет в случае необходимости быстро и легко отрегулировать положение шпинделей относительно системы базирования.

6. Специальная прижимная пята

Специальная прижимная пята с изменяемой формой поверхности прижима (рис. 35) применяется для сверления особо тонкими сверлами и снижает разброс отверстий при сверлении, улучшает качество отверстий, уменьшая неровности на поверхности (рис. 36), снижает вероятность поломки сверла.

7. Операционная система и программное обеспечение

Семейство станков Posalux Ultraspeed работает в системе реального времени QNX, отличающейся стабильностью и устойчивостью к случайному аварийному выключению питания.

Программное обеспечение станка, функционирующее под ОС QNX и разработанное программистами фирмы Posalux, является максимально дружественным интерфейсом с интуитивно понятным управлением. Поддержка сенсорного экрана также обеспечивает удобство и простоту общения с системой. Все настройки станков осуществляются в графическом режиме с помощью виртуальных кнопок сенсорного экрана (пиктограмм). Фирма Posalux постоянно совершенствует систему.

Особенности и преимущества станков Posalux Ultraspeed:

1. Линейные приводы по всем осям в базовой комплектации.
2. Операционная система QNX.
3. Конвейерная смена инструмента.
4. «Интеллектуальный» контроллер S&M на каждый шпиндель.
5. Управляющий IBM-совместимый компьютер на базе процессора Pentium с контроллером Intel 850.
6. Применение новейших синхронных шпинделей, а также высокоскоростного синхронного шпинделя PX 300 с максимальной скоростью вращения до 300 тыс. об/мин.
7. Независимые приводы по оси X для двух-трех шпинделей на одной станции.
8. Изменяемый размер поверхности прижимной пяты.
9. Более динамичный рабочий стол (рис. 37), позволяющий разгонять ось Y до 75 м/мин и модернизированную систему базирования и прижима заготовок, что увеличивает производительность и точность.
10. Управление несколькими станками с одного рабочего места.
11. Подключение к сети Ethernet.

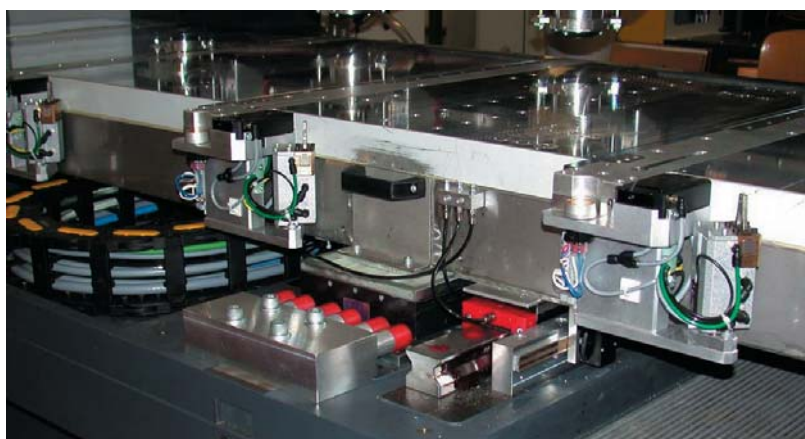


Рис. 37. Рабочий стол и привод современного станка Posalux

Выводы

Возвращаясь к вопросу об эволюции станков для механического формирования отверстий под металлизацию, предваряющего статью, можно утверждать, что использование современных технических решений в конструкциях сверлильно-фрезерных станков, даже таких высокопроизводительных и высокоточных швейцарских станков, как Posalux Ultraspeed, — еще один шаг в развитии данного класса оборудования. Основой для этого утверждения является, например, отсутствие на данный момент универсальных шпинделей, способных поддерживать весь необходимый диапазон скоростей вращения для сверления (от 8 тыс. об/мин для сверл диаметром

порядка 6 мм до 500 тыс. об/мин для сверл диаметром 0,1 мм и меньше) при идеальных для инструмента скоростях резания материала диэлектрического основания FR4 (150–180 м/мин) и неизменности крутящего момента. Также в будущем возможно улучшение точности заглабления глухих отверстий до 0,1 mil (миллидойма), что актуально для тонких внутренних проводящих слоев, поскольку наилучший контакт можно получить при наличии медного дна глухого отверстия. И последнее, это увеличение производительности в дальнейшем за счет применения новых материалов и конструкций для подвижных частей станков и последних разработок программно-аппаратных средств, используемых для контроля и управления.