

**Козюба М.М.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

**Гребенюк А.М.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЕЛЕКТРОННИХ ВИРОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕРСТАТА “PROTOMAT M60”

*У статті розглядається та обґрунтований спосіб оперативного виготовлення за допомогою верстата “ProtoMat M60” прототипів друкованих плат із металізацією перехідних отворів друкованих плат електронних виробів, які максимально відповідають параметрам серійних зразків виробів. Запропоновано й освоєно хімічне й гальванічне наросування міді в перехідних отворах і на контактних площинках прототипів друкованих плат. Крім того, для створення якісних і надійних паяних з’єднань між выводами електронних компонентів і контактними площинками друкованих плат запропоновано й освоєно нанесення фінішного покриття «гальванічне олово-вісмут».*

*Такий спосіб дозволяє виготовляти прототипи двосторонніх друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності й металізацією перехідних отворів і контактних площинок фінішним гальванічним покриттям олово-вісмут товщиною покриття 10–20 мікрон.*

*Фінішне гальванічне покриття олово-вісмут забезпечує високу площинність контактних площинок прототипів друкованих плат і дозволяє проводити монтаж мініатюрних електронних компонентів із малим кроком виводів. Товщина фінішного гальванічного покриття, більша за 10 мікронів, запобігає утворенню інтерметалевих прошарків, більших за 1 мікрон, у паяних з’єднаннях. Крім того, таке покриття має високу механічну міцність, стійкість до стирання та до негативного впливу навколишнього середовища. Усі вище перераховані фактори дозволяють проводити монтаж широкої номенклатури електронних компонентів на прототипи друкованих плат електронних виробів за технологією групового поверхневого монтажу з оплавленням паяльної пасти на обох сторонах друкованої плати й забезпечити високу якість і надійність паяних з’єднань. Зокрема, така технологія дозволяє проводити монтаж електронних компонентів із безсвинцевими покриттями виводів за температур пайки 230–240° С.*

*Надійність отриманих паяних з’єднань у прототипах друкованих плат електронних виробів підтверджена успішним проведенням багаторазових кліматичних, вібраційних, термоциклічних та ударних випробувань із позитивним результатом.*

**Ключові слова:** друковані плати, фінішне гальванічне покриття олово-вісмут, електронні компоненти, контактні площинки, перехідні отвори, паяльна паста, поверхневий монтаж.

**Постановка проблеми.** Для утримування лідерських позицій на ринку електронних виробів, виробники повинні випускати нові продукти, в короткі терміни. Як правило, основою електронного виробу є друкована плата. В Україні в основному виготовляються двосторонні друковані плати 4–5 класу точності з фінішним покриттям хімічне олово товщиною 1 мікрон. Для швидкого освоєння нових виробів необхідно в короткі терміни виготовити та оптимізувати від одного до декількох прототипів друкованих плат серійного зразка електронного виробу. Термінове замовлення та виготовлення декількох одиниць прототипів друкованих плат у виробників друкованих

плат має велику собівартість. Оскільки створення друкованої плати серійного зразка є процесом творчим, розробнику може знадобитися декілька прототипів друкованих плат. Отже, процес створення прототипу друкованої плати серійного зразка може мати термін понад 1 місяця та високу собівартість.

Верстат “ProtoMat M60” швидкісна система виготовлення прототипів друкованих плат дозволяє проводити такі операції: фрезерування топології поверхні заготовки друкованої плати, свердлування отворів, фрезерування вікон s пазів, обрізання по контуру згідно з проектною документацією. Технічні характеристики “ProtoMat M60”

дають можливість виготовляти прототипи друкованих плат з такими характеристиками [1, с. 52]:

- мінімальна ширина провідника – 0,1 мм;
- мінімальний зазор між провідниками – 0,1 мм;
- мінімальний діаметр свердлування – 0,2 мм.

Верстат “ProtoMat M60” дозволяє швидко виготовляти прототипи друкованих плат без підготовки поверхні заготовки. Такі прототипи друкованих плат не враховують всіх електричних характеристик серійних зразків електронного виробу (перехідний опір, паразитні ємності й індуктивності). Для наближення прототипів друкованих плат до серійних зразків електронних виробів запропоновано використання хіміко-гальванічних процесів для виконання металізації перехідних отворів і поверхні заготовки друкованих плат: хімічної міді, гальванічної міді й хімічного олова й фінішного гальванічного покриття олово-вісмут.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Технологія створення якісних прототипів друкованих плат електронних виробів висвітлена в публікаціях таких авторів, як П. Лунд [2], Х.-И. Ханке, Х. Фабиан [3], Є.В. Пірогова [7], М. Махмудов [8] та стандарті [5] і галузевому стандарті [6].

Розвиток сучасної електронної апаратури базується на мініатюризації, підвищенні ефективності використання матеріалів і зменшенні матеріаломісткості, поліпшенні якості й надійності виробів. Вирішення цих завдань можливе за використання сучасної елементної бази й технології монтажу на поверхню, що дозволяє підвищити щільність монтажу від 4 до 6 разів [4, с. 6].

Забезпечити зменшення ваги й габаритних розмірів друкованих вузлів виробів електронних виробів можна за допомогою двобічного монтажу електронних компонентів на друковані плати.

Виготовлення макетів друкованих плат без металізації перехідних отворів складається з таких етапів:

1. Обробка інформації РСВ-файла за допомогою програм CircuitCAM, BordMaster.
2. Підготовка заготовки.
3. Свердлування отворів.
4. Фрезерування поверхні (у разі двосторонньої друкованої плати – фрезерування з двох сторін).
5. Фрезерування по контуру.

Для електричного з’єднання рисунків провідників двосторонніх друкованих плат без металізації перехідних отворів застосовують такі методи:

- впаювання проволони або штифтів;
- запресовування порожнистих заклепок за допомогою додаткового пристрою LPKF EasyContac.

Друковані плати виготовлені без металізації перехідних отворів комбінованим методом мають низьку надійність із таких причин:

- у металізованому отворі проводиться тільки одне паяне з’єднання тоді як при використанні порожнистих заклепок їх необхідно три: припаювання заклепки з провідниковою доріжкою з двох сторін заготовки та припаювання контактного виводу електронного компонента [1, с. 165; 7, с. 163]. Збільшення кількості паяних з’єднань в одному знакомісці зменшує надійність такого з’єднання та значно збільшує розміри контактної площинки. Так, за необхідності мати внутрішній діаметр отвору 0,5 мм, – зовнішній діаметр заклепки, а значить і отвору під заклепку, становитиме 0,8 мм, що на 0,3 мм більше, тому тенденцію на мінімізацію розмірів друкованих плат важко виконати;

- впаювання дротів, штифтів і заклепок може привести до зміни параметрів електричної схеми (паразитні ємності та індуктивності) при проектуванні друкованих плат із щільним розташуванням компонентів. Особливо це важливо під час проведення налагодження виробів, де є необхідність проведення заміни електронних компонентів. Крім того попереднє впаювання дротів, штифтів і заклепок зменшує надійність паяних з’єднань готового друкованого вузла електронного виробу, оскільки збільшується кількість пайок.

**Постановка завдання.** Отже, метою статті є вибір швидкого способу (методу) створення прототипів якісних друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності з металізацією перехідних отворів та контактних площинок фінішним гальванічним покриттям олово-вісмут та аналіз можливостей використання цього способу для проведення операцій групового поверхневого монтажу електронних компонентів включаючи компоненти з безсвинцевими покриттями виводів та оцінити надійність паяних з’єднань в таких платах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Існують механічні й хімічні способи виготовлення прототипів друкованих плат. Механічний спосіб забезпечує видалення шару фольгованої міді фрезою по заданій програмі. Хімічний спосіб ґрунтується на травленні фольгованої міді хімічними розчинами. Для отримання хімічним способом топологічного рисунка на заготовці прототипу друкованої плати, який би відповідав інформації РСВ-файлу, необхідно виготовити фотошаблон (провести п’ять технологічних операцій), покрити заготовку світло чутливою плівкою (провести шість технологічних операцій), провести

фото експонування, виконати ще цілий ряд операцій, в тому числі і хімічне покриття міддю, гальванічне покриття міддю та олово-вісмутом, щоб витравити мідне покриття заготовки хімічним методом. [5; 6]. Авторами в роботі використовувалась комбінована технологія: механічне фрезерування та свердлування та хімічне нарощування шарів металізації. При виготовленні прототипів друкованих плат автори використовували готовий двосторонній фольгований склотекстоліт марки FR-4 товщиною від 0,5 до 2,0 мм різних виробників. Найкраще себе зарекомендував склотекстоліт FR-4, виготовлений в Німеччині та Чехії. Якість цього матеріалу відповідає стандарту IPC4101B, системи управління якістю виробників, підтверджена міжнародними сертифікатами ISO 9001:2000. FR-4 – склотекстоліт класу вогнетривких 94V-0 має високу механічну міцність та хімічну стійкість.

Високе значення адгезії фольги до основи діелектрика та високе значення об'ємного й поверхневого електричного опору, стабільність геометричних розмірів дозволяє застосовувати склотекстоліт FR-4 під час проведення операцій монтажу навіть безсвинцевих електронних компонентів.

Нами були опрацьовані режими фрезерування та свердлування фольгованого склотекстоліту FR-4 виробництва фірми “Isola”, Німеччина, які дозволили виготовляти топологічні елементи 100 мікрон на прототипах друкованих плат товщиною від 0,5 мм до 2 мм.

Технічні характеристики отриманих гальванічних покриттів дозволяють проводити груповий монтаж прототипів друкованих плат з обох їх сторін використовуючи спосіб оплавлення паяльної пасти в конвекційній печі навіть за температурними профілями оплавлення безсвинцевих паяльних паст.

Виготовлення прототипів друкованих плат із металізацією перехідних отворів складається з таких етапів:

1. Обробка інформації PCB-файла за допомогою програм CircuitCAM, BordMaster.

2. Етап базового методу виготовлення друкованих плат:

– підготовка поверхні заготовки (фольгованого міддю склотекстоліту);

– покриття заготовки бакелітовим лаком.

3. Свердлування отворів на верстаті “ProtoMat M60”.

4. Етап базового методу виготовлення друкованих плат:

– хіміко-механічна підготовка поверхні отворів;

– хімічна металізація отворів (активація хлористим паладієм, хімічна мідь);

– зняття бакелітового лаку;

– хімічна підготовка поверхні заготовки (знежирювання, активація соляною кислотою);

– електролітичне міднення;

– електролітичне нанесення сплаву олово-вісмут.

3. Фрезерування заготовки поверхні прототипу друкованої плати на верстаті “ProtoMat M60” (створення рисунка топології друкованої плати).

4. Фрезерування прототипу друкованої плати по контуру на верстаті “ProtoMat M60”.

5. Коректування рисунка під мікроскопом.

Такий спосіб дозволяє виготовляти прототипи друкованих плат із такими характеристиками:

– товщина хімічної міді в перехідних отворах – 1 мікрон;

– товщина гальванічної міді в перехідних отворах – 25 мікронів;

– товщина хімічного покриття олова 1 – мікрон;

– товщина фінішного гальванічного покриття олово-вісмут – 10–20 мікрон;

– температура плавлення фінішного гальванічного покриття олово-вісмут – 220–225° C;

– фінішне гальванічне покриття олово-вісмут з товщиною не менше 9 мікронів зберігає паяємість протягом 1 року без використання додаткових підшарів покриття та додаткового оплавлення;

– фінішне гальванічне покриттям олово-вісмут забезпечує високу плоскісність контактних площинок прототипів друкованих плат і дозволяє проводити монтаж мініатюрних електронних компонентів із малим кроком виводів;

– товщина фінішного гальванічного покриття понад 10 мікронів запобігає утворенню інтерметалевих прошарків понад 1 мікрона в паяних з'єднаннях. Крім того, таке покриття має високу механічну міцність, стійкість до стирання та до негативного впливу навколишнього зовнішнього середовища.

Нами були опрацьовані режими фрезерування та свердлування фольгованого склотекстоліту FR-4 виробництва фірми “Isola”, Німеччина, які дозволили виготовляти топологічні елементи 100 мікронів на прототипах друкованих плат товщиною від 0,5 мм до 2 мм.

Технічні характеристики отриманих гальванічних покриттів дозволяють проводити груповий монтаж прототипів друкованих плат з обох їх сторін використовуючи спосіб оплавлення паяльної пасти

в конвекційній печі навіть за температурними профілями оплавлення безсвинцевих паяльних паст.

Якщо виготовлення прототипу друкованої плати без металізації отворів займає близько одного-двох робочих днів, то виготовлення друкованої плати з металізацією отворів, згідно з технологією виготовлення друкованих плат базовим методом, близько трьох робочих днів. Такий спосіб металізації отворів в порівнянні з іншими методами має ряд переваг:

- суттєво підвищується надійність паяних з'єднань шляхом того що припій під дією капілярного ефекту при відповідному виборі діаметру заповнює весь перехідний отвір. Крім цього досягається хороша електрична та механічна стабільність паяного з'єднання при відносно малій контактній площинці, що є важливим для зменшення малогабаритних характеристик друкованих вузлів. Міцність на розривання виводів елементів у місцях пайки їх на контактні площинки і на металізований отвір – більша на отворах [1, с. 164];

- виключення дротів для монтажу перехідних отворів забезпечує підвищену надійність паяних з'єднань під час вібраційних, ударних та кліматичних випробувань [1, с. 162];;

- товщина гальванічної міді в перехідних отворах у 25 мікронів зменшує розтріскування покриття, а отже збільшує надійність вузла;

- товщина фінішного покриття олово-вісмут у 10–20 мікронів зменшує утворення інтерметалевого прошарку в паяному з'єднанні та підвищує його надійність.

Для порівняння вартість хімічного нанесення покриття олово-вісмут буде меншою за гальванічне нанесення покриття олово-вісмут. Якщо порівняти такі характеристики хімічного та гальванічного олова як товщина, термін зберігання, здатність до швидкого росту інтерметалевих прошарків в самому покритті то гальванічне олово має перевагу перед хімічним, особливо це стосується електронних виробів відповідального призначення.

Такий спосіб виготовлення прототипів двосторонніх друкованих плат з металізацією перехідних отворів і контактних площинок гальванічним оловом товщиною 10–20 мікронів дозволив авторам виготовляти прототипи друкованих плат із такими характеристиками:

- мінімальна ширина провідника – 0,1 мм;
- мінімальний зазор між провідниками – 0,1 мм;
- мінімальний діаметр перехідного отвору з металізацією – 0,3 мм;
- габаритні розміри – 540 x 375 мм.

Перевагами цього способу є висока точність виготовлення провідників, зазорів та перехідних отворів; одночасне свердлування перехідних отворів та висока зставність обох сторін друкованої плати у випадку двосторонньої плати.

Використання прототипів друкованих плат дає можливість конструктору оперативно перевірити схемотехнічні рішення, протестувати плати та при необхідності в короткі терміни внести зміни в конструкцію електронного вузла.

Ця технологія була використана при виготовленні більше 100 друкованих плат для електронних виробів. Монтаж прототипів друкованих плат з обох їх сторін проводився за технологією групового поверхневого монтажу використовуючи спосіб оплавлення паяльної пасти в конвекційній печі навіть за температурними профілями оплавлення безсвинцевих паяльних паст. Прототипи друкованих вузлів готових електронних виробів і пройшли термоциклічні, вібраційні й ударні випробування. Відмов паяних з'єднань друкованих вузлів не було.

Отже, така технологія дозволяє в короткі терміни виготовити прототипи двосторонніх друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності й металізацією перехідних отворів і контактних площинок фінішним гальванічним покриттям олово-вісмут товщиною покриття 10–20 мікронів для дослідних зразків електронних виробів навіть відповідального призначення.

**Висновки.** Отримані результати дозволяють проводити монтаж широкої номенклатури електронних компонентів на прототипах друкованих платах двобічним груповим поверхневим монтажем електронних компонентів з оплавленням паяльної пасти на обох сторонах плати одночасно, та забезпечити їх високу якість та надійність. Створення технології виготовлення прототипів дослідних та серійних зразків друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності з металізацією отворів з використанням етапів базового методу, дозволяє швидко отримати за допомогою верстата "ProtoMat M60" діючі дослідні й серійні зразки друкованих вузлів навіть змонтованих за безсвинцевою технологією. Особливо це важливо коли необхідно внести зміни до конструкції дослідних зразків виробів, які пройшли випробування та є нагальна потреба їх доопрацювання.

Прототипи електронних вузлів виготовлені за вищезгаданою технологією, успішно пройшли кліматичні, вібраційні, термоциклічні випробування та ударні випробування з позитивним результатом.

**Список літератури:**

1. Інструкція з експлуатації: LPKF Laser Electronics AG, Manual, ProtoMat M60.
2. Лунд П. Прецизионные печатные платы: Конструирование и производство / Перевод с английского. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
3. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / Перевод с немецкого ; Под редакцией В.Н. Черняева. Москва : Энергия, 1980. 464 с.
4. Грачев А.А., Мельник А.А., Панов Л.И. Поверхностный монтаж при конструировании и производстве электронной аппаратуры. Черкасы : McLaut Издатель Чабаненко Ю.А., 2004. 428 с.
5. ГОСТ 23752-79. ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Общие технические условия. [Скасований без заміни 2018-01-01. Використовується як довідковий матеріал]. Москва, 1991. 32 с.
6. ОСТ.4.054.060-82. Отраслевой стандарт. Платы печатные. Типовые технологические процессы. 41 с.
7. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. Учебник. Москва : ФОРУМ: ИНФРА, 2005. 569 с.
8. Махмудов М. Механическая обработка печатных плат. Москва : Радио и связь, 1986. 72 с.

**Hrebeniuk A.M., Kozyuba M.M. REDUCING FEATURES OF PROTOTYPING PRINTED CIRCUIT BOARDS OF ELECTRONIC PRODUCTS USING THE “PROTOMAT M60” MACHINE**

*The article discusses and substantiated the method of prompt manufacturing prototypes of printed circuit boards using the machine “ProtoMap M60” with the subsequent metallization of vias of printed circuit boards of electronic products which correspond to the maximum parameters of serial samples of products. Proposed and mastered galvanic build-up of copper in vias and on contact areas of prototypes of printed circuit boards. In addition, to create high-quality and reliable soldered connections between the terminals of electronic components and contact areas of printed circuit boards, it has been proposed and mastered using galvanic tin-bismuth as a finishing coating.*

*This method makes it possible to manufacture prototypes of 4th class double-sided printed circuit boards with 5th class accuracy elements with metallization of vias and contact pads with a finishing galvanic tin-bismuth coating with thickness of 10–20 microns.*

*The finish tin-bismuth coating was applied using the existing equipment at the institute.*

*The finish tin-bismuth galvanic coating provides high flatness of the contact pads of PCB prototypes and allows installation of miniature electronic components with a small pin steps. A galvanic coating thickness of more than 10 microns prevents the formation of intermetallic layers of more than 1 micron in brazed joints. In addition, this coating has high mechanical strength, resistance to abrasion and to the negative effects of the environment. All of the above factors make it possible to mount a wide range of electronic components on prototypes of printed circuit boards of electronic products using group surface mounting technology with reflow of solder paste on both sides of the printed circuit board and to ensure high quality and reliability of soldered joints. In particular, this technology allows the installation of electronic components with lead-free pins at soldering temperatures of 230–240°C.*

*The reliability of the obtained soldered joints in prototypes of printed circuit boards of electronic products is confirmed by the successful multiple climatic, vibration, thermal cyclic and shock tests with a positive result.*

**Key words:** *printed circuit boards, tin-bismuth finishing galvanic coating, electronic components, contact pads, vias, solder paste, surface mounting.*