

Prototyp w godzinę - precyzja niemal przemysłowa

Płytki drukowane w domu, część 2

Termotransfer - metoda „kredowa“

W pierwszej części artykułu wspomniałem o wadzie nierozłącznie związanej ze stosowaniem folii termotransferowej, polegającej na mechanicznym uszkodzeniu rysunku mozaiki występującym podczas odrywania folii. Powstaje zatem pytanie, czy można usunąć nośnik w inny sposób, np. przez rozpuszczenie? W tym właśnie kryje się idea prostej modyfikacji polegającej na zastąpieniu poliestrowej folii... papierem. Mając gotowy projekt, należy go wydrukować lub skopiować na kserografie na gładkim, powlekanym papierze kredowym. Po naprasowaniu wzoru mozaiki na płytkę drukowaną, płytkę wraz z maską umieszcza się na

kilka minut w ciepłej wodzie. Kredowa powłoka nie ulega wprawdzie rozpuszczeniu, ale pod wpływem wody mięknie, po czym daje się usunąć w sposób niezagrażający całości mozaiki.

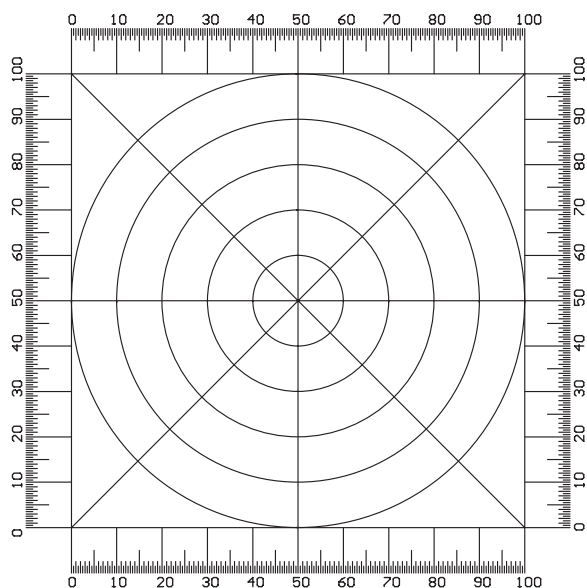
Nie potrafię jednoznacznie określić, komu należy przypisać autorstwo tego pomysłu. Po raz pierwszy zetknąłem się z nim ponad rok temu na liście dyskusyjnej *avt.ep.elektronika*. Efekty wstępnych testów okazały się na tyle interesujące, że postanowiłem zająć się tym tematem znacznie dokładniej. Przedstawione w artykule wyniki i szczegółowy sposób postępowania są rezultatem licznych prób mających na celu zdobycie wprawy i dopracowanie technologii.

W drugiej części artykułu przedstawiamy opis metody „żelazkowej“, która jest jedną z najlepiej rokujących w warunkach amatorskich. Jak się przekonacie, możliwe do osiągnięcia wyniki są - przy odrobinie wprawy - niewiarygodnie dobre.

Papier

Od papieru stosowanego jako nośnik w metodzie termotransferowej oczekujemy spełnienia kilku warunków: gładkości powierzchni, rozpuszczalności powłoki i odporności na temperaturę. Chropowatość rzutuje przede wszystkim na precyzję odwzorowania krawędzi. W praktyce można

przyjąć, że błędy spowodowane nierównością powierzchni powinny być mniejsze niż nieuniknione błędy wprowadzane przez raster drukarki. Spośród kilku przetestowanych gatunków papieru wybrałem do prób *Papier kredowy do prac dyplomowych* o gramaturze 115 g/m² produkowany przez UNIPAP Strzegom (cena ok. 15 zł/



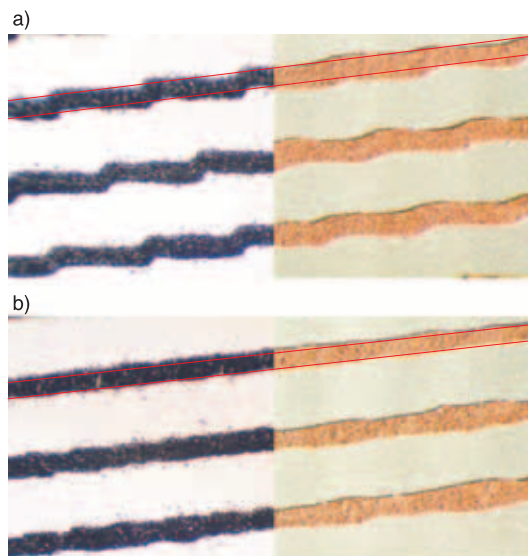
Rys. 5. Podziałka testowa wykorzystana do określenia stopnia deformacji papieru (widok zmniejszony do 60%)

100 ark.). Charakteryzuje się on gładkim licem i odpornością na deformację, a zarazem jest na tyle elastyczny, że bez problemu przechodzi przez układ prowadzenia arkusza w drukarce. Niektórzy uczestnicy *pl.misc.elektronika* propagują również konkurencyjny wariant, polegający na wykorzystaniu cienkiego papieru klasy LWC używanego powszechnie do druku czasopism (w tym również Elektroniki Praktycznej). Skrót LWC pochodzi od angielskiej nazwy *LightWeight Coated paper* i oznacza papier o gramaturze rzędu 70 g/m² powleczony gładką warstwą złożoną m.in. z węgla wapnia (kredy), gliny kaolinowej i lateksu. *Termogazetotransfer* - taka bowiem żartobliwa nazwa przylgła do tego wariantu metody, posiada niezaprzeczalne zalety. Dzięki mniejszej grubości, a także nieco innym właściwościom powłoki, pozostałości papieru LWC są znacznie łatwiejsze do usunięcia z powierzchni laminatu. Zarazem wiąże się to jednak z pewnymi niedogodnościami:

- Pozostałości kredy wypełniającej mikroporowate nieuszczelnienia w warstwie tonera chronią przed nadtrawianiem płaszczyzn miedzi. Delikatne pokrycie papieru LWC zmywa się niemal bez śladu, odsłaniając ew. nieuszczelnienia w nadruku.
- Niewielka gramatura papieru sprzyja deformacji podczas prasowania, co może utrudniać utrzymanie powtarzalnych wymiarów całej płytki.
- W kserograficznych punktach usługowych znacznie łatwiej

będzie uzyskać kopię na czystej kartce papieru kredowego niż na kolorowej reklamie wyciętej z jednego z popularnych czasopism kobiecych. Aczkolwiek, jak wykazuje dotychczasowa praktyka, wydruk na zadrukowanym papierze LWC nie powoduje zauważalnej szkody dla mechanizmów drukarki.

Bardzo istotną cechą papieru odróżniającą go od folii z tworzyw sztucznych jest jego higroskopijność. Kartka papieru przechowywana w normalnych warunkach mieszkaniowych zawsze zawiera pewien procent wody. Poddana utrwalaniu termicznemu w drukarce a następnie nagrzewaniu podczas prasowania ulega szybkiemu wysuszeniu, co powoduje zmianę wymiarów (skurcz) i to na dodatek różniący się wielkością w dwóch prostopadłych kierunkach. Seria prób polegająca na pomiarze przetransferowanej podziałki testowej (rys. 5) o rozmiarach 100x100 mm wykazała, że skurcz papieru (o gramaturze 115 g/m²) pobranego bezpośrednio „z półki” może przekraczać 0,5 mm/100 mm. Jest to wystarczająco dużo, aby uzyskana odchyłka wymiarów uniemożliwiła zgranie warstw płytki dwustronnej lub np. swobodne osadzenie 40-pinowego gniazda IDC. Prosty zabieg sprowadzający się do kilkudziesięciosekundowego suszenia arkusza na stoliku grzewczym, bezpośrednio przed wydrukiem, pozwolił na zredukowanie skurczu do wartości mniejszej niż 0,2 mm/100 mm, czyli akceptowalnej w warunkach amatorskich.



Fot. 6. Ścieżki 6 mils nachylone pod kątem 6,3° do osi rastra - wydruk na papierze i odwzorowanie w miedzi. Widoczne schodki powstały w wyniku rasteryzacji z rozdzielczością (a) 300 dpi i (b) 600 dpi. Zaznaczone linie symbolizują krawędzie ścieżek zawartych w projekcie

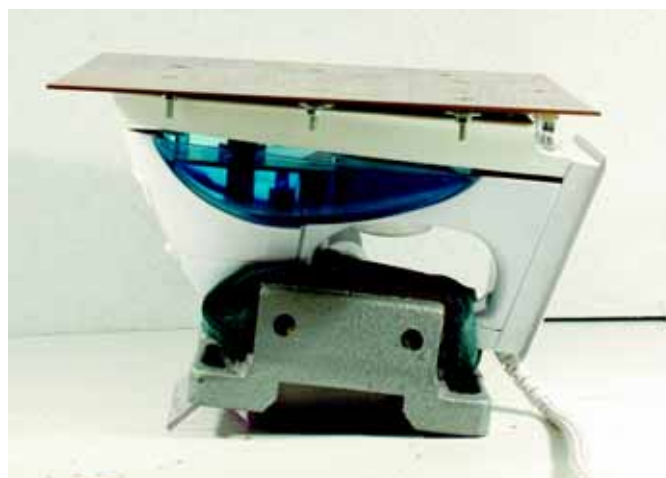
Drukarka

O możliwości wykorzystania danej drukarki (lub kserokopiarki) do wykorzystania w metodzie transferowej decydują rodzaj i ilość nakładanego tonera oraz rozdzielczość i jakość druku.

Oceniając przydatność wydruku, należy zwrócić szczególną uwagę na jednolitość (szczelność) krycia dużych płaszczyzn oraz ilość nałożonego tonera. Wydrukowane ścieżki powinny być wyczuwalne w dotyku jako nieznaczne zgrubienia na powierzchni papieru. Niemal wszystkie próby prezentowane w artykule zostały wykonane na drukarce laserowej HP LaserJet 4+ o roz-

dzielczości 600 dpi (z alternatywnym tonerem firmowanym przez Esselte). Pozytywne wyniki, potwierdzające możliwość transferu tonera i jego odporność na trawienie, uzyskałem również z wydrukami z drukarek HP LaserJet 2200 (1200 dpi), Lexmark Optra E310 oraz kopiarkami Minolta (laser) i Canon NP5060 i NP6612. Od innych osób otrzymałem również pozytywne opinie dotyczące kilku drukarek z serii HP (HP111, HP4Si, HP5L, HP6P) oraz OkiPage 8W.

Drukarka laserowa jest urządzeniem rastrowym, a to oznacza, że wydrukowane krawędzie ścieżek pionowych lub poziomych są „przyciągane” do



Fot. 7. Wbrew potocznej nazwie metody, żelazko służy nie do prasowania, a jako gorący stolik podgrzewający od spodu płytkę laminatu. Optymalna temperatura płytki wynosi ok. 155...160°C



Fot. 8. Przykładanie maski do powierzchni gorącego laminatu. Alternatywnie można przytwierdzić maskę na zimno, skrawkami samoprzylepnego papieru. Należy zwrócić baczną uwagę, aby w pierwszych sekundach nagrzewania nie nastąpiło przesunięcie i rozmazanie przenoszonego obrazu

siatki rastra, natomiast krawędzie ścieżek ukośnych mają w rzeczywistości postać linii schodkowej. Zakres rozdzielczości popularnych obecnie drukarek laserowych rozciąga się od 300 dpi (punktów na cal) w najstarszych urządzeniach do 1200 dpi.

Żeby uzmysłowić sobie znaczenie tego parametru, wyrażmy wielkość jednego punktu rastra w jednostkach *mils*. Otóż rozdzielczość 300 dpi - odpowiada ok. 3,3 mils, 600 dpi - ok. 1,7 mils, a 1200 dpi to ok. 0,83 mils. Na fot. 6 możemy zobaczyć mikroskopowe zdjęcie ukośnych ścieżek o szerokości 6 mils wydrukowanych na papierze, a następnie wytrawionych w miedzi. Próbkę została wykonana w dwóch rozdzielczościach: 300 dpi (a) oraz 600 dpi (b).

Uzyskane efekty prowadzą do wniosku, że do wytwarzania precyzyjnych PCB, nawet w warunkach amatorskich, należy sięgnąć po drukarkę o rozdzielczości co najmniej 600 dpi. Ilość nanoszonego tonera wymaga dobrania w drodze eksperymentu. W testowej drukarce HP4+ najlepsze wyni-

ki osiągałem, ustawiając dawkowanie tonera na 1 lub 2 stopień w skali 1...5.

Wydruk

Żagadnieniem, na które zwraca się szczególną uwagę we wszystkich opisach wytwarzania PCB, jest prawidłowa orientacja masek odpowiadających poszczególnym warstwom projektu. Wydruki poszczególnych warstw wykonane bez modyfikacji, bezpośrednio z programu CAD, mają taką samą orientację jak na ekranie, tzn. warstwy górne (*TopLayer*, *TopOverlay*) są widoczne tak jak na rzeczywistej płytce, natomiast warstwy dolne (*BottomLayer*, *BottomOverlay*) jako prześwitujące przez płaszczyzną laminatu. Przykładając maskę do płytki, musimy ją ułożyć tonerem do powierzchni miedzi. Zatem warstwy górne wymagają wydrukowania w odbiciu lustrzanym (*mirror*). Natomiast wydruki warstw dolnych podłożone pod płytkę już przylegają tonerem do miedzi, czyli nie wymagają odbicia lustrzanego (**tab. 2**).

Zwróćmy uwagę, że tradycyjny podział na „stronę elemen-

Tab. 2. Orientacja wydruków poszczególnych warstw płytki drukowanej

Warstwa	Przeznaczenie	Orientacja wydruku
Top Overlay	Górny opis elementów	lustrzana
Top Layer	Górna mozaika połączeń (Component Side - strona elementów)	lustrzana
Bottom Layer	Dolna mozaika połączeń (Solder Side - strona lutowania)	prosta
Bottom Overlay	Dolny opis elementów	prosta



Fot. 9. Najwygodniejszym sposobem prasowania okazało się użycie dwóch, ciasno zwiniętych, szmacianych tamponów. Jednym przytrzymujemy gorącą płytkę, a drugim pocieramy papier miejsce obok miejsca, dociskając toner do powierzchni miedzi

to“ i „stronę lutowania“ mający rację bytu w przypadku montażu przewlekane go traci sens w przypadku płytek obłożonych dwustronnie elementami SMD.

Laminat

Wymagania jakościowe i zasady przygotowania powierzchni laminatu (zmatowienie i odłuszczenie) nie różnią się od opisanych przy okazji omawiania metody fotolitograficznej. Metoda termotransferowa jest jednak bardziej wrażliwa na obecność rys i wgłębień na powierzchni laminatu, które mogą uniemożliwić dociśnięcie tonera i skutkujących np. nieprzewidywanymi przewodzeniami ścieżek. Kupując laminat, należy również zwrócić uwagę na spłot tkaniny szklanej (osnowy) widoczny jako siateczka wgłębień na powierzchni miedzi. Zbyt głęboki relief występujący w miernej jakości laminatach może znacznie utrudnić precyzyjny transfer drobnych elementów projektu.

Przy amatorskim zakupie niewielkich ilości laminatu z przypadkowych źródeł zazwyczaj zwraca się uwagę jedynie na rodzaj podłoża (najczęściej

będzie to laminat papierowo-fenolowy np. FR-2, szklano-epoksydowy np. FR-4 lub kompozytowy np. CEM-1), przyjmując milczące założenie, że grubość folii miedzianej wynosi typowo 35 µm. Istotnie jest to grubość standardowa, stosowana powszechnie do wytwarzania jedno- i dwustronnych płytek drukowanych metodami subtraktywnymi (bez metalizacji otworów). Należy jednak zdawać sobie sprawę, że w technologiach przemysłowych używa się także folii miedzianej o innych grubościach i takie laminaty również można napotkać w sklepach elektronicznych. Folie o grubości większej niż standardowa (70 µm i 105 µm) znajdują zastosowanie w płytkach o podwyższonej obciążalności prądowej, natomiast laminaty z cienkimi foliami (12 µm, 17,5 µm) są materiałem stosowanym m.in. do wytwarzania płytek metalizowanych wykonywanych metodą póładdytywną, w której następuje elektrolityczne osadzenie dodatkowej warstwy miedzi. Wyjaśnijmy przy okazji, dlaczego grubość folii miedzianej przybiera tak nietypowe wartości. Otóż podstawowy laminat pokryty folią 35 µm

Cu w krajach anglosaskich jest określany jako *jednouncjowy*, czyli zawierający miedź o masie jednej uncji na stopę kwadratową 1oz/sq.ft (gęstość miedzi $\rho_{Cu} = 8,96 \text{ g/cm}^3$, 1 oz. = 28,3495 g, 1 ft = 0,3048 m). Analogicznie - foliom cieńszym od standardowej odpowiadają oznaczenia 1/3 oz. i 1/2 oz., a foliom grubym 2 oz. i 3oz. Z grubością warstwy miedzi bezpośrednio wiąże się jej rezystancja powierzchniowa, a co za tym idzie dopuszczalna obciążalność prądowa ścieżek oraz głębokość podtrawień powodujących zwięźlenie ścieżek poniżej ich nominalnej szerokości. W tab. 3 zestawiono typowe grubości miedzi i odpowiadające im orientacyjne wartości rezystancji powierzchniowej uzyskiwane na gotowych płytkach.

Żelazko, prasowanie

Przenoszenie rysunku stanowi etap najtrudniejszy a zarazem najbardziej zależny od zdobytej wprawy. W czasie przenoszenia powierzchnia tonera musi zostać nadtopiona, a następnie dokładnie dociśnięta na całej powierzchni płytki. Wbrew potocznej nazwie metody, żelazko wcale nie najlepiej nadaje się do prasowania. Praktykowane niekiedy dociskanie maski do laminatu gorącą stopką żelazka jest obarczone dwoma wadami:

- Przyklejenie tonera wymaga dosyć silnego docisku i co ważniejsze docierającego równomiernie do każdego miejsca na płytce. Podczas nagrzewania, laminat łatwo ulega deformacji, co znacznie utrudnia jednolite przyklejenie maski na całej powierzchni.
- Podłoże laminatu posiada pewną pojemność cieplną. Po

przyłożeniu żelazka od strony papieru następuje szybkie mięknięcie tonera, podczas gdy powierzchnia miedzi wciąż pozostaje zimna. W moim odczuciu sytuacja taka sprzyja przypadkowym przesunięciom maski i rozmazywaniu przenieszonego rysunku.

Na podstawie własnych doświadczeń mogę stwierdzić, że znacznie lepsze wyniki daje odwrócenie żelazka stopką do góry i potraktowanie go jako gorącego stolika nagrzewającego płytkę od spodu, czyli od strony laminatu. Wszystkie próby zostały wykonane z użyciem prowizorycznej, ale zarazem dosyć skutecznej konstrukcji widocznej na fot. 7. Płyta z grubej blachy mosiężnej, dociśnięta śrubami do obrzeża stopki żelazka, zwiększa powierzchnię pola roboczego i jednocześnie ma za zadanie ujednolicić rozkład temperatur na jej powierzchni. Tanie żelazko dalekowschodniej „marki“ o mocy grzałki 1200 W, z regulatorem ustawionym na maksimum, zapewnia utrzymanie centralnej strefy stolika w temperaturze ok. 155...160°C. Niestety, ze względu na zbyt małą przewodność cieplną mosiądzu i niewielką grubość płyty, rozkład temperatur uzyskany na prototypowym stoliku jest daleki od optymalnego, dlatego następną wersja stolika zostanie wyposażona na płytę miedzianą lub aluminiową o grubości co najmniej 10 mm.

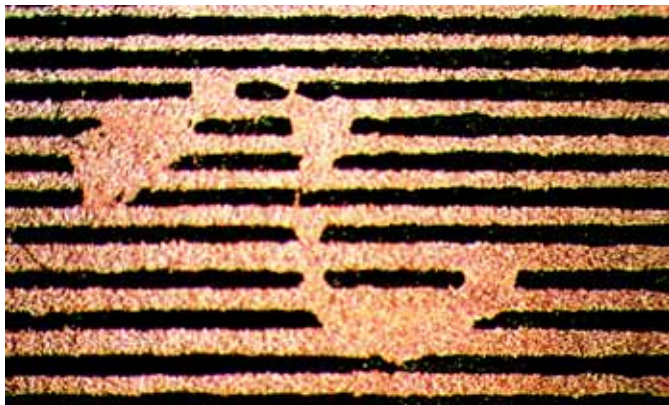
Papier z wydrukiem układamy tonerem do dołu na oczyszczonej powierzchni miedzi i przytwierdzamy na krawędzi skrawkami papieru samoprzylepnego. Należy pamiętać o prycięciu papieru z zachowaniem co najmniej 10



Fot. 10. Krytyczny punkt metody, zależny od nabytej wprawy. Uplastyczniony toner rozlewa się na powierzchni miedzi w stopniu proporcjonalnym do temperatury stolika i nacisku tamponu. Oba fragmenty widoczne na zdjęciu pochodzą z jednej płytki, a finalna różnica szerokości ścieżek zależy wyjątkowo od czasu i siły prasowania

Tab. 3. Zestawienie typowych grubości miedzi i odpowiadające im orientacyjne wartości rezystancji powierzchniowej

Grubość Cu	Powierzchniowa masa Cu (oz/sq.ft)	Rezystancja powierzchniowa (@25°C)
12 µm	1/3	
17,5 µm	1/2	1,0 mΩ/□
35 µm	1	0,5 mΩ/□
70 µm	2	0,25 mΩ/□
105 µm	3	



Fot. 11. W porównaniu z fotolitografią wymagania odnośnie czystości są nieporównywalnie mniejsze, mimo to nie należy ich lekceważyć. Na zdjęciu - spustoszenia w rysunku ścieżek (6 mils) spowodowane przez włos pozostawiony między płytką a papierem

mm marginesu od obrysu projektu, co pozwoli na wyeliminowanie błędów występujących zazwyczaj na krawędziach arkusza. Dokładne ustalenie pozycji papieru ma zasadnicze znaczenie przy wykonywaniu płytek dwustronnych, a także w przypadku niewielkiego nadmiaru laminatu. W praktyce, przy wykonywaniu płytek jednostronnych upraszczałem sobie pracę kładąc papier dopiero na nagrzanym laminacie (fot. 8). Ponieważ toner szybko przykleja się do gorącej płytki, to po zdobyciu pewnego doświadczenia można nie obawiać się rozmazania przenoszonego obrazu.

Najwygodniejszym sposobem prasowania okazało się użycie dwóch, ciasno zwiniętych, szmacianych tamponów (fot. 9). Jednym z nich przyciskamy papier i gorącą płytkę do stolika, natomiast drugim pocieramy miejsce obok miejsca, dociskając toner do powierzchni miedzi. W miarę prasowania, niewidoczny początkowo rysunek ścieżek zaczyna przebiegać przez papier tworząc zauważalny relief na jego powierzchni. Czas prasowania i siła docisku są parametrami, których niestety nie da się określić z góry i trzeba je ustalić metodą prób i błędów, stopniowo dochodząc do wprawy. Orientacyjnie można przyjąć, że całość operacji na stoliku zamyka się w czasie ok. 1...3 minut. Weźmy pod uwagę, że uplastyczniony toner rozplywa się na powierzchni miedzi w stopniu proporcjonalnym do temperatury stolika i nacisku tamponu. Oba fragmenty pokazane na fot. 10 pochodzą z tej samej płytki testowej i celowo różnią się czasem i siłą użytą podczas prasowania.

Metoda termotransferowa, w porównaniu z fotolitografią nie stawia prawie żadnych wymagań odnośnie czystości pomieszczenia, dzięki temu całkowicie wystarczają jej warunki panujące w mieszkaniu lub pokoju biurowym. Jedynym momentem wymagającym szczególnej staranności jest przykładanie papieru do płytki. Należy zwrócić uwagę, aby nie pozostawić pomiędzy nimi zanieczyszczeń (włos, ziarno piasku itp.) mogących uniemożliwić równomierne dociśnięcie papieru (fot. 11).

Usuwanie papieru

Mając za sobą prasowanie, zdejmujemy płytkę ze stolika i pozwalamy jej ostygnąć. W tym czasie przygotowujemy kąpiel złożoną z ciepłej wody z dodatkiem kilku kropel detergentu (np. płynu do mycia naczyń). Domieszka detergentu zmniejsza napięcie powierzchniowe i ułatwia penetrację wody i dzięki temu wspomaga nasiąkanie papieru. Mięknienie można także przyspieszyć, zarysowując paznokciami jego górną powierzchnię. Zazwyczaj po upływie 5...10 minut warstwa celulozy daje się oddzie-



Fot. 12. Resztki powłoki kredowej działają jak maska chroniąca przez dostępem kąpielii trawiącej i powodują występowanie zwarc. Przy myciu należy zwrócić szczególną uwagę na oczyszczenie wąskich odstępów między ścieżkami i otworów służących do centrowania wiertła



Fot. 13. Do usuwania resztek powłoki kredowej można użyć szczoteczki do zębów, a najlepiej - opuszka własnego palca. Prawidłowo nałożony toner mocno przylega do miedzi i wytrzymuje bez uszkodzenia nawet energiczne pocieranie

lić, pozostawiając na płytce resztki powłoki kredowej przyklejone do powierzchni tonera. Usuwanie resztek kredy jest najbardziej pracochłonnym (trwa nawet do 10 minut) etapem procesu, a jednocześnie staranność z jaką się je wykonuje decyduje o braku zwarć pomiędzy ścieżkami (fot. 12). Do usunięcia powłoki można posłużyć się np. szczoteczką do zębów, aczkolwiek w praktyce najskuteczniejsze okazały się strumień ciepłej wody i opuszek palca.

Warstwa tonera zaskakująco mocno przylega do powierzchni miedzi i wytrzymuje nawet energiczne pocieranie, bez obawy oderwania ścieżek (fot. 13). Zauważyłem przy tym, że wmywanie kredy zachodzi oporniej, jeżeli papier został wcześniej poddany szybkiemu suszeniu na żelazku. Szybkim

sposobem na pozbycie się całej kredy może być jej wytrawienie, np. przez przetarcie płytki tamponem nasyconym 10% kwasem octowym. Niestety usuwając mostki pomiędzy ścieżkami zmywamy jednocześnie powłokę uszczelniającą mikropory w warstwie tonera. Ten sam problem dotyczy wariantu polegającego na wykorzystaniu papieru LWC. Łatwość usuwania kredowej powłoki zostaje okupiona ryzykiem naruszenia zasłoniętych płaszczyzn miedzi i wytrawiania mikroskopijnych kraterów w jej powierzchni.

Marek Dzwonnik, AVT
marek.dzwonnik@ep.com.pl

Za miesiąc, w ostatniej części artykułu, dokończymy opis postępowania a także przedstawimy możliwości i ograniczenia prezentowanej technologii.