

Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



100100237736

MONTAŻ

W ELEKTRONICE

JAN FELBA

JAN FELBA

MONTAŻ W ELEKTRONICE



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
WROCLAW 2010

Recenzent

Ryszard Kisiel

Opracowanie redakcyjne

Agnieszka Ściepuro

Korekta

Alina Kaczak

Agnieszka Ściepuro

Projekt okładki, skład i łamanie

Dominika Osadców

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy.

© Copyright by

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wrocław 2010

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficwyd.pwr.wroc.pl>; e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-533-3

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 697/2010

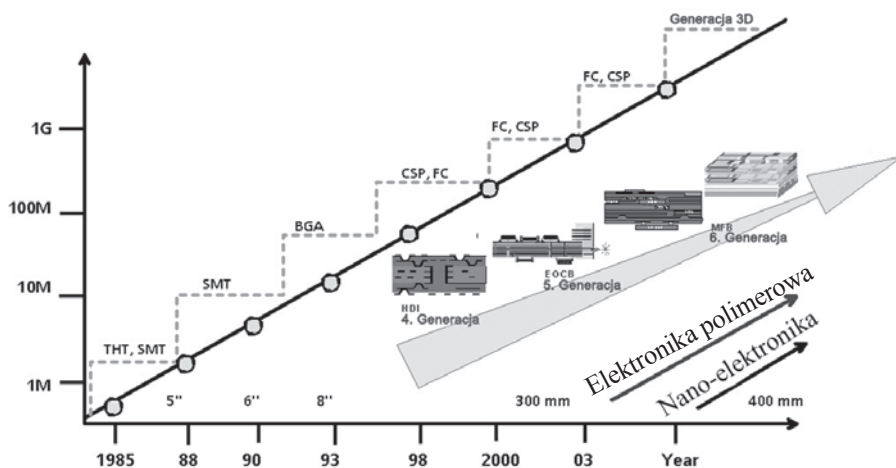
SPIS TREŚCI

1. Wstęp	5
2. Poziomy i technologie montażu	9
3. Montaż drutowy	19
4. Montaż flip chip	27
5. Elementy, obudowy, architektura wyprowadzeń	41
5.1. Elementy czynne i bierne do montażu przewlekanego	41
5.2. Elementy bierne do montażu powierzchniowego	42
5.3. Obudowy układów scalonych.....	45
6. Podłoża. Płytki obwodów drukowanych	55
6.1. Rodzaje podłoży	55
6.2. Wytwarzanie płytek obwodów drukowanych	59
6.3. Płytki wielowarstwowe	62
6.4. Powłoki kontaktowe	67
6.5. Projektowanie mozaiki ścieżek i pól kontaktowych	71
7. Podstawy procesu lutowania, stopy i pasty lutownicze	75
7.1. Lutowanie	75
7.2. Montaż bezołowiowy	76
7.3. Zwilżanie	79
7.4. Procesy kapilarne	84
7.5. Procesy dyfuzyjne	86
7.6. Związki międzymetaliczne	87
7.7. Stopy lutownicze bezołowiowe	89
7.8. Topniki i ich rola w tworzeniu połączenia lutowanego	91
7.9. Pasty lutownicze.....	93
8. Technologie lutowania	99
8.1. Techniki lutowania w zależności od konstrukcji zespołu	99
8.2. Lutowanie ręczne	100
8.3. Lutowanie na fali	102
8.4. Lutowanie rozplywowe.....	110

9. Wady połączeń lutowanych	123
9.1. Niezwilżanie	125
9.2. Wady lutowania w montażu przewlekany	126
9.3. Wady lutowania w montażu powierzchniowym	129
9.4. Wady połączeń lutowanych wykonanych techniką flip chip	132
9.5. Wady specyficzne dla lutów bezołowiowych.....	134
9.6. Metody kontroli jakości połączeń lutowanych.....	135
10. Mycie po procesie lutowania	139
10.1. Zanieczyszczenie	139
10.2. Skutki zanieczyszczeń	140
10.3. Mycie i środki myjące	143
10.4. Kontrola czystości.....	144
11. Kleje i klejenie	147
11.1. Kleje strukturalne	147
11.2. Kleje przewodzące elektrycznie.....	149
11.3. Kleje przewodzące ciepłnie	157
11.4. Sposoby dozowania kleju.....	161
12. Połączenia i złącza	165
12.1. Połączenia rozłączne	165
12.2. Połączenia nierozłączne	170
12.3. Przewody i kable	172
13. Narażenia środowiskowe. problemy odprowadzenia ciepła	175
13.1. Niezawodność w montażu elektronicznym	175
13.2. Narażenia środowiskowe	176
13.3. Narażenia mechaniczne	177
13.4. Narażenia termiczne	181
13.5. Odprowadzanie ciepła	183
13.6. Chłodzenie	185
Literatura	195

1. WSTĘP

W wielu dziedzinach działalności człowieka urządzenia elektroniczne stają się nieodzownym elementem, bez których trudno sobie wyobrazić funkcjonowanie we współczesnym świecie. Dotyczy to przede wszystkim urządzeń informatycznych, telekomunikacyjnych, medycznych i wielu innych; nie sposób wszystkich ich wymieniść. Obserwuje się również nieustannie wzrastający popyt na zminiaturyzowaną elektronikę użytkową o wysokim poziomie funkcjonalności. Dotyczy to między innymi takich urządzeń, jak: telefony komórkowe, kamery cyfrowe i aparaty fotograficzne, komputery osobiste, pamięci przenośne (ang. *pendrive*) itp. Jednym z podstawowych kryteriów oceny funkcjonalności urządzenia elektronicznego jest szybkość jego działania. Na podstawie tego kryterium (dokładniej – częstotliwość taktowania zegarów mikroprocesorowych) na rysunku 1.1 przedstawiono kierunek rozwoju przemysłu elektronicznego począwszy od lat osiemdziesiątych zeszłego stulecia do najbliższej przyszłości.



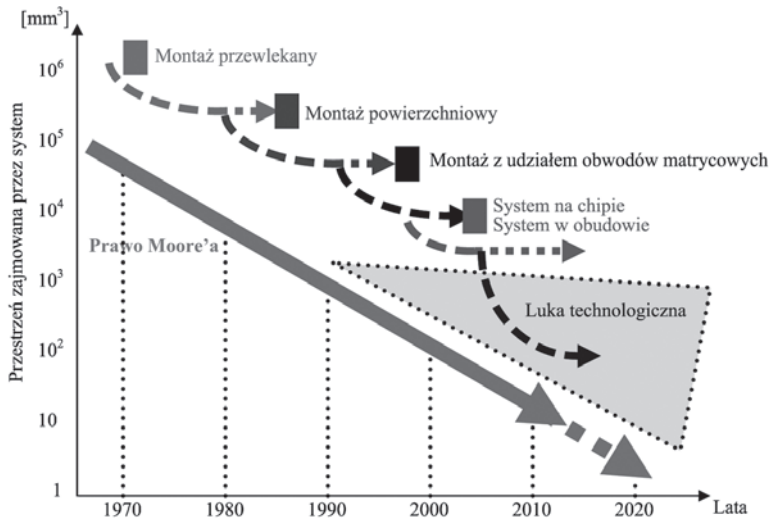
Rys. 1.1. Kierunek rozwoju przemysłu elektronicznego wg [1]

Wzrost częstotliwości pracy przyrządów półprzewodnikowych jest możliwy dzięki zastosowaniu coraz to nowocześniejszych technologii wytwarzania struktur półprzewodnikowych. Podstawową komórką składową każdego przyrządu półprzewodnikowego (układu scalonego) jest tranzystor. W chwili wynalezienia zajmował on przestrzeń kilkunastu centymetrów sześciennych, a już we wczesnych latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia wytwarzano tranzystory w skali rzędu 500 nm. W chwili obecnej do-

minują konstrukcje, w których podstawowe odległości są znacznie mniejsze niż 100 nm. Miniaturyzacja rozmiarów tranzystora odbywa się w myśl zasady prawa Moore'a, które mówi, że ekonomicznie optymalna liczba tranzystorów w układzie scalonym ulega podwojeniu co 18 miesięcy. Oczywiście rozmiary tranzystora nie mogą być zmniejszane w nieskończoność i niebawem prawo Moore'a przestanie obowiązywać.

W wyniku tak znacznego postępu technologicznego powstaje konieczność umieszczenia na określonej powierzchni układu scalonego coraz większej liczby wyprowadzeń, które pozwalają na przyłączenie do struktury półprzewodnikowej wejściowych i wyjściowych sygnałów. Innymi słowy, nieustanny wzrost miniaturyzacji przyrządów półprzewodnikowych stwarza konieczność zagęszczenia wyprowadzeń w obudowach układów scalonych. Przyczyniło się to do opracowania w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia obudów typu BGA (ang. *Ball Grid Array*) i później CSP (ang. *Chip Scale Package*), które do chwili obecnej są najczęściej stosowanymi obudowami wielowyprowadzeniowych układów scalonych (rys. 1.1).

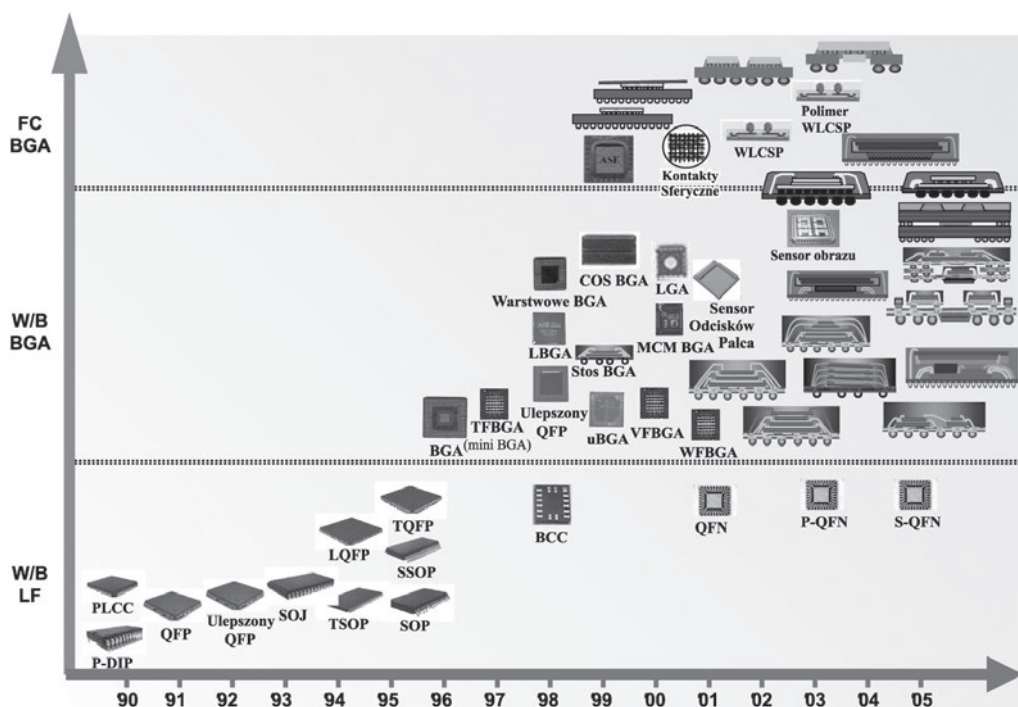
Niezależnie od złożoności oraz przeznaczenia urządzenia elektronicznego, nieodzowną jego częścią, oprócz podzespołów elektronicznych, jest płytką obwodu drukowanego. Stanowi ona zarówno obwód elektryczny, za pomocą którego łączone są ze sobą w sieć podzespoły elektroniczne, jak również pełni ona rolę nośnika mechanicznego dla wszystkich przyłączanych podzespołów. W zależności od rodzaju montowanych na płytce podzespołów elektronicznych wymagany jest odpowiedni sposób ich montażu. Na rysunku 1.2 przedstawiono rozwój technik montażu podzespołów na płytkach obwodów drukowanych w zależności od postępującej miniaturyzacji podzespołów elektronicznych.



Rys. 1.2. Rozwój technik montażu podzespołów na płytkach obwodów drukowanych [2]

Obecnie możliwość umieszczenia na płycie obwodu drukowanego nowoczesnych półprzewodnikowych podzespołów elektronicznych jest dość ograniczona z powodu dużej gęstości rozmieszczenia wyprowadzeń tych podzespołów. W związku z tym należy dążyć do zagęszczenia połączeń w płytkach obwodów drukowanych tak, aby umożliwić montaż podzespołów elektronicznych o małym rastrze wyprowadzeń. Jest to jedno z głównych wyzwań dla producentów płytek obwodów drukowanych, co zobrazowano na rysunku 1.2 obszarem określanym mianem luki technologicznej.

Z przedstawionego przeglądu widać, że rozwój funkcjonalny i miniaturyzacja urządzeń elektronicznych w znacznym stopniu zależy od technik montażu. Można wprowadzić stosować integrację systemu elektronicznego na poziomie struktury półprzewodnikowej, ale znacznie większe możliwości daje integracja na poziomie upakowania (na przykład na płytkach obwodów drukowanych). Oznacza to, że sposób połączenia elementów czynnych i biernych będzie decydował o funkcji systemu.



Rys. 1.3. Obudowy i techniki montażu wg [3]

Pojęcie „montaż w elektronice” obejmuje całą gamę zagadnień i celem niniejszej książki jest przedstawienie podstawowych informacji o tych zagadnieniach. Stosowane techniki są bardzo różne, co wynika między innymi z uwarunkowań funkcjonalnych i ekologicznych, a także z hierarchiczności poziomów montażu. Inaczej montuje się struktury półprzewodnikowe od obudów, inne techniki stosuje się montując poszczególne elementy

na płytkach obwodów drukowanych, inaczej montuje się moduły w szafach sterujących. W niniejszej książce przedstawiono techniki montażu drutowego, lutowania, klejenia i tworzenia złączy (np. rozłącznych), a także zagrożenia jakie mogą te techniki wprowadzać. Aby zrozumieć sposoby łączenia elementów w podzespoły, niezbędna jest wiedza o standardowych wyprowadzeniach (kontaktach) elementów, o stosowanych przez przemysł elektroniczny obudowach, produkowanych płytkach obwodów drukowanych i innych nośnikach struktur. Wiedza ta powinna także umożliwić samodzielne projektowanie zespołów z uwzględnieniem zasad montażu. Dlatego też podane zostały, między innymi, zasady projektowania mozaiki pól lutowniczych na płytkach, informacje o narażeniach środowiskowych i sposobach odprowadzania ciepła.

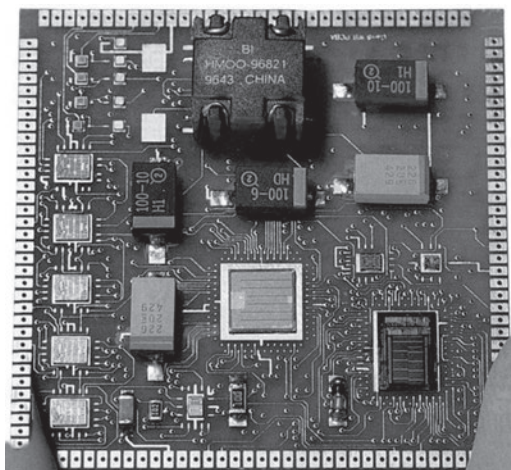
Montaż elektroniczny na poziomie podłoża, (ang. *System on Package*) jest jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin technologicznych w nowoczesnej elektronice. Poznanie wszystkich technik i typów obudów (rys. 1.3) znacznie przekracza ramy niniejszego opracowania, tym bardziej że jest to wiedza trudna do bezpośredniego zastosowania w miejscach pracy czytelników i absolwentów polskich uczelni. Ograniczono się zatem do przekazania wiadomości na takim poziomie, aby wiedza ta mogła być bądź bezpośrednio wykorzystana przez inżynierów utrzymania ruchu (np. na liniach montażowych) i przyszłych przedsiębiorców organizujących usługi w dziedzinie montażu, bądź pogłębianą przez pracowników ośrodków naukowo-badawczych i rozwojowych.

Niezwykle szeroka tematyka technologiczna i materiałowa montażu elektronicznego nie może być dogłębnie analizowana w ograniczonych ramach opracowania. Czytelnicy, którzy chcą pogłębić wiedzę dotyczącą wybranych zagadnień mogą sięgnąć do bogatej światowej literatury. Także w języku polskim pojawia się coraz więcej zwartych publikacji, które mogą być pomocne w uzupełnieniu wiedzy przekazywanej w opracowaniu. Na szczególną uwagę zasługują takie pozycje, jak: *Lutowanie bezolowiowe* (Krystyna Bukat, Halina Hackiewicz, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2007), *Numeryczne metody projektowania termomechanicznego w montażu elektronicznym* (Artur Wymysłowski, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008), czy *Połączenia lutowane w montażu elektronicznym z zastosowaniem materiałów ekologicznych* (Ryszard Kisiel, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009).

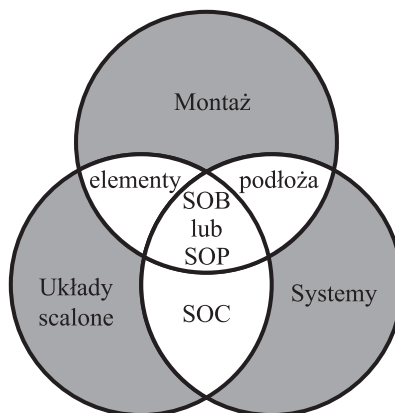
Tytuł niniejszego opracowania to *Montaż w elektronice*. W powszechnym użyciu w środowisku, a także w zdecydowanej większości publikacji, stosowane jest określenie „montaż elektroniczny” jako dziedzina wiedzy związana z czynnościami polegającymi na połączeniu w jeden zespół lub system elektroniczny wielu oddzielnych struktur, podzespołów, modułów itp. Czynności te mają zapewnić trwałe połączenia mechaniczne, elektryczne i umożliwić wydajne odprowadzenie ciepła. W odbiorze ogólnym „montaż elektroniczny” może jednak sugerować działanie przy wspomaganiu systemów elektronicznych. „Montaż w elektronice” eliminuje takie skojarzenia i jednoznacznie określa strefę działania. Jednakże w niniejszej pracy, adresowanej do specjalistów, używane będzie tradycyjne określenie „montaż elektroniczny”.

2. POZIOMY I TECHNOLOGIE MONTAŻU

Montaż elektroniczny składa się z szeregu czynności i etapów technologicznych, które prowadzą do zbudowania funkcjonalnego urządzenia elektronicznego. Wykonanie i skuteczne funkcjonowanie takiego urządzenia jest zależne, między innymi, od poprawnego wykonania połączeń elektrycznych między elementami, a następnie podzespołami funkcjonalnymi, zwykle z użyciem konstrukcji pośrednich (np. płytek obwodów drukowanych – tak jak pokazano to na rys. 2.1).



Rys. 2.1. Podzespół elektroniczny zmontowany z pojedynczych elementów na płycie obwodu drukowanego [4]



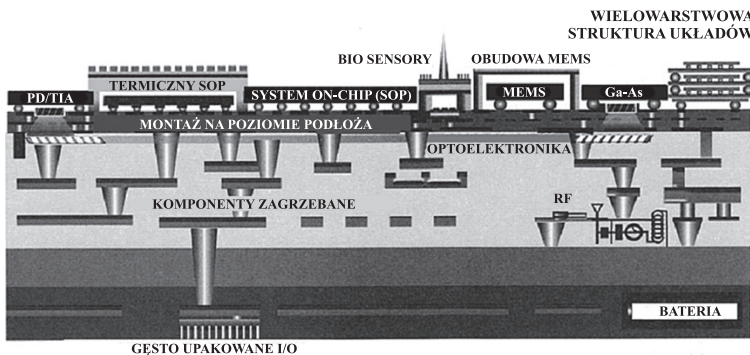
Rys. 2.2. Schemat relacji między montażem elektronicznym, układami scalonymi i systemami wg [5]

Postęp w zakresie technik montażu był wymuszany, między innymi, przez coraz to nowsze rozwiązania w zakresie układów scalonych. Układ scalony stał się istotnym elementem urządzeń elektronicznych konstruowanych od końca lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Obecnie możliwe jest wykonywanie całych systemów elektronicznych przez upakowanie układu scalonego oraz innych przyrządów elektronicznych (mikrosystemów, przyrządów optoelektrycznych, podzespołów radiowych, mikrofalowych itp.) w obszarze jednej struktury półprzewodnikowej. Technologia taka nosi nazwę SOC (ang. *System on Chip*) i oznacza integrację na poziomie półprzewodnikowej płytki podłożowej. W ten sposób powstaje system i można oznaczyć wspólne pole (przenikanie) pomiędzy układem scalonym i systemem (rys. 2.2).

Innym podejściem jest technologia SOP (ang. *System on Package*), czyli upakowanie elementów na poziomie podłoża montażowego. Jako podłoże stosowana jest płytki obwodu drukowanego PCB (ang. *Printed Circuit Board*), na której mogą być także montowane struktury nieobudowane i wówczas może być używane określenie SOB (ang. *System on Board*). W takich warunkach stworzenie systemu wymaga zastosowania odpowiednich obudów i podłoży montażowych, i co najważniejsze – czynności montażu (rys. 2.2).

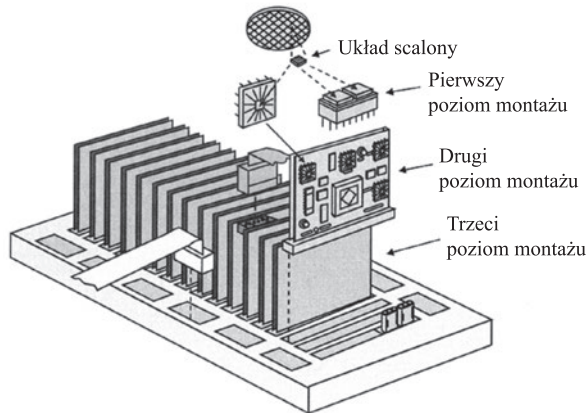
Najważniejsze zalety i cechy upakowania na poziomie wspólnego podłoża (SOP) to:

- duża elastyczność projektowania,
- możliwość stosowania technologii heterogenicznych o właściwościach równych lub przewyższających technologie stosowane w wypadku SOC,
- zapewnienie dużego uzysku, obniżenia kosztów wykonania oraz skrócenia czasu wprowadzenia produktu do sprzedaży,
- duża niezawodność wynikająca z możliwości dopasowania wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej dla struktur półprzewodnikowych oraz podłoża,
- możliwość wykonania w podłożu wbudowanych elementów czynnych i biernych,
- wykonanie połączeń między układami a podłożem w postaci połączeń drutowych lub łączników w podłożach półprzewodnikowych, co gwarantuje małą podziałkę wyprowadzeń. Przykład technologii SOP pokazano na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. System on Package wg [6]

Technologia SOP, czyli połączenie wielu elementów czynnych i biernych w funkcjonalny zespół, to tylko fragment procesu montażu elektronicznego, który można podzielić na kilka etapów. Już w fazie bezpośrednio po produkcji układów scalonych na dużej płytce podłożowej mogą nastąpić procesy łączenia. Nazwano to zerowym poziomem montażu. Dotyczy on wykonywania połączeń elektrycznych na powierzchni półprzewodnikowej płytki podłożowej jeszcze przed jej pocięciem na indywidualne struktury. Poziom zerowy wykorzystywany jest głównie do izolacji systemów lub może dotyczyć montażu elementów składowych mikrosystemów znajdujących się na powierzchni płytki półprzewodnikowej, np. membran. Często stosowaną techniką montażu na tym poziomie jest klejenie.

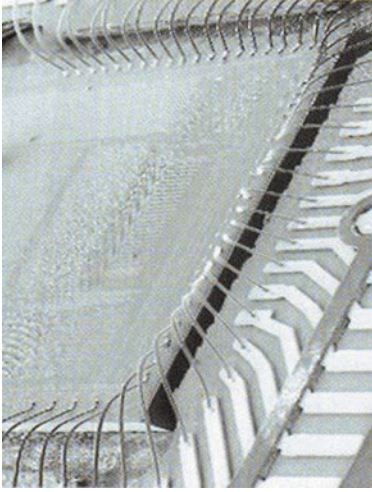


Rys. 2.4. Poziomy montażu elektronicznego wg [5]

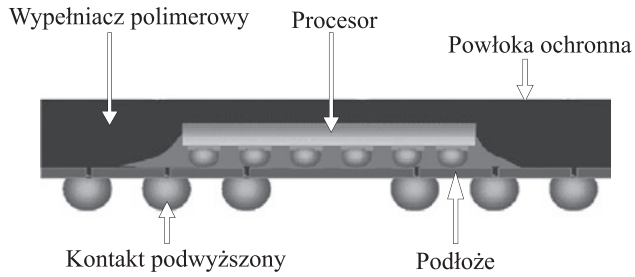
Pola kontaktowe struktury układu scalonego łączy się z końcówkami wyprowadzeń obudowy za pomocą połączeń drutowych. Obudowany układ montuje się na płycie obwodu drukowanego lub innym nośniku w celu połączenia go z pozostałymi elementami zespołu. Zespoły te łączy się ze sobą w funkcjonalne pojedyncze urządzenie elektroniczne. Tak powstałe bloki można dalej kompletować w duże urządzenie. Wszystkie te etapy montażu obejmują nie tylko połączenia mechaniczne i zamknięcie części funkcjonalnych w obudowie, ale wymagają spełnienia podstawowych wymogów montażu, takich jak rozproszanie sygnałów elektrycznych oraz zasilania wewnątrz obudowy, a także rozwiązanie problemu chłodzenia. W konstruowaniu urządzeń elektronicznych można wyróżnić cztery poziomy montażu (rys. 2.4):

A. Pierwszy poziom montażu dotyczy wykonywania połączeń elektrycznych, mechanicznych i cieplnych wewnątrz układów scalonych (mikroukładów, mikrosystemów) oraz obejmuje problemy związane z zamontowaniem struktury półprzewodnikowej w obudowie i nadaniem jej cech samodzielnego podzespołu odpornego na działanie środowiska. Pola kontaktowe struktury łączy się z końcówkami zewnętrznymi układu scalonego techniką montażu drutowego (ang. *wirebonding*), rys. 2.5, chociaż coraz częściej stosuje się także połączenia z wykorzystaniem kontaktów podwyższonych wykonywanych w technologii flip chip. Nazwa technologii montażu flip chip nie ma prostego odpowiednika w języku polskim. Można ten sposób połączeń opisać jako montaż struktur półprzewodnikowych wierzchnią stroną (zaopatrzoną w pola kontaktowe) skierowaną do podłoża. Według nazewnictwa proponowanego w Polskich Normach, strukturą flip chip nazywa się strukturę z wyprowadzeniami sferycznymi, natomiast proces montażu – montażem struktur czołowych. Technologie flip chip stosuje się zarówno do połączeń struktury mikroprocesora do obudowy (pierwszy poziom montażu), jak i obudowy do płytki obwodu drukowanego (drugi poziom montażu). Przykład pokazano na rysunku 2.6.

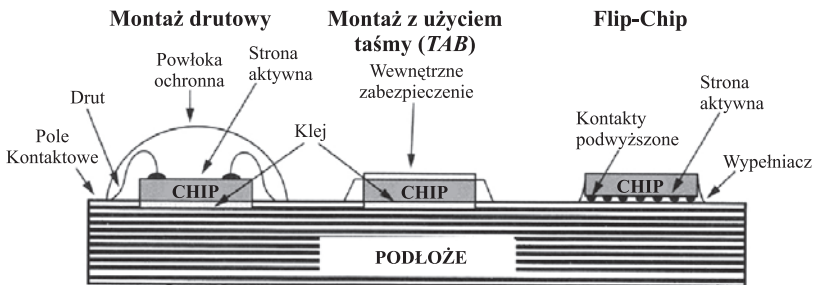
B. Drugi poziom dotyczy montażu nieobudowanych i obudowanych układów scalonych, podzespołów biernych i mikrosystemów na płytkach obwodów drukowanych. Montaż nieobudowanej struktury półprzewodnikowej na płycie obwodu drukowanego określa się akro-



Rys. 2.5. Montaż drutowy [4]



Rys. 2.6. Montaż flip chip przy połączeniu struktury mikroprocesora do obudowy (powyżej) oraz obudowy do płytki obwodu drukowanego [7]

**Dwie opcje:**

- połączenia kulkowe
- połączenia klinowe

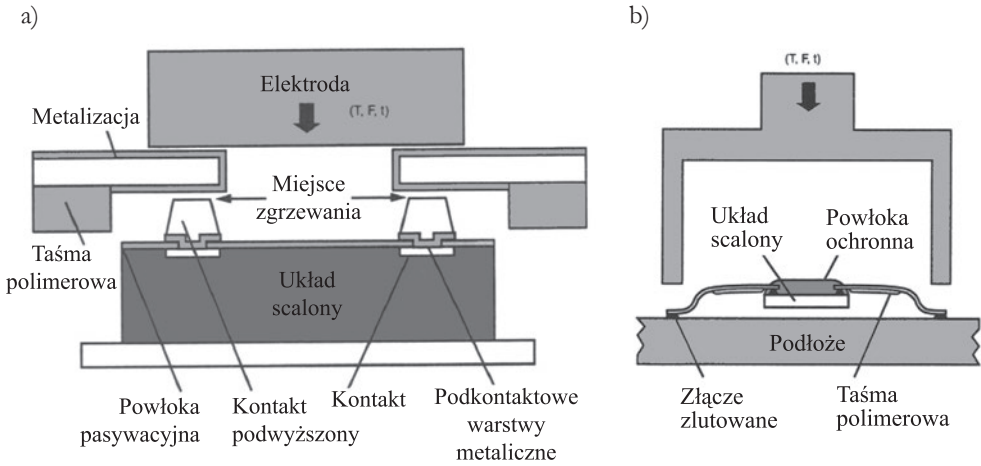
Dwie opcje:

- strona aktywna na górze
- strona aktywna na dole

Trzy opcje:

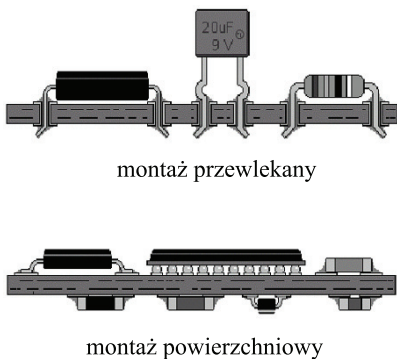
- połączenia metalurgiczne
- połączenia metalurgiczne i klejone
- połączenia klejone

Rys. 2.7. Techniki montażu struktur nieobudowanych wg [5]

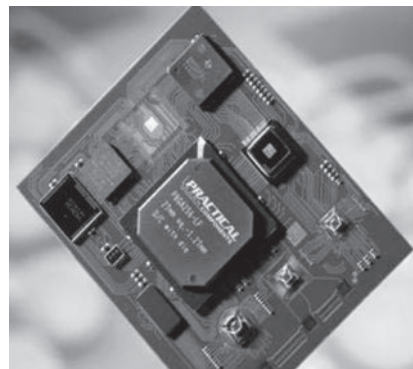


Rys. 2.8. Mikromontaż automatyczny z udziałem taśmy (TAB) wg [5]:
 a) montaż wewnętrzny, b) montaż zewnętrzny

nimem COB (ang. *Chip on Board*). W montażu takich struktur do połączeń pomiędzy wyprowadzeniami sygnałowymi układu scalonego i polami kontaktowymi PCB stosowane są trzy techniki: montaż drutowy, mikromontaż automatyczny z udziałem taśmy TAB (ang. *Tape Automated Bonding*) oraz montaż flip chip. Te trzy techniki przedstawiono schematycznie na rysunku 2.7. W technice TAB wykorzystuje się metalizowaną elastyczną polimerową taśmę, co umożliwia automatyczny montaż o dużej wydajności. Na pierwszym etapie tworzy się tzw. metalowe kontakty podwyższone (ang. *bump*) na wyprowadzeniach struktury, które łączy się z metalową końcówką taśmy – najczęściej przez zgrzewanie termokompresyjne. Na kolejnym etapie zabezpiecza się (ang. *encapsulation*) powierzchnię struktury wraz z przyłączami specjalną zalewą, która po utwardzeniu stanowi ochronę przed narażeniami środowiskowymi. Etapy techniki TAB pokazano na rysunku 2.8.



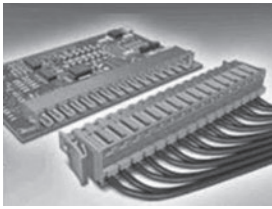
Rys. 2.9. Montaż przewlekany i montaż powierzchniowy [5]



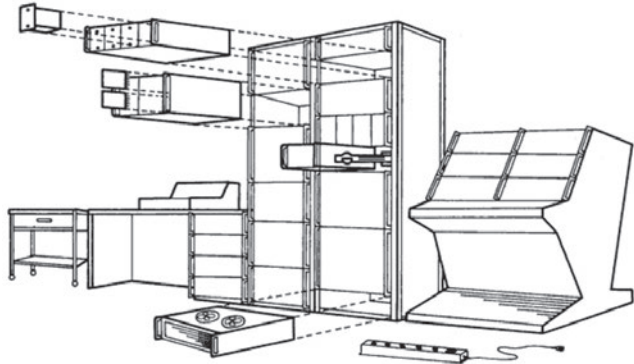
Rys. 2.10. Płytki obwodu drukowanego z elementami montowanymi różnymi technikami [3]

W montażu struktur obudowanych najczęściej stosowanymi technikami są lutowanie i klejenie. W lutowaniu wyróżnia się technologie montażu przewlekanego (ang. *Through Hole Technology*, THT) oraz montażu powierzchniowego (ang. *Surface Mount Technology*, SMT). Zasadnicze różnice między tymi technologiami ilustruje rys. 2.9. Do montażu powierzchniowego stosowane są elementy o płaskich kontaktach (ang. *Surface Mount Devices*, SMD). Należy zaznaczyć, że rozbudowana płytki obwodu drukowanego może zawierać elementy montowane różnymi technikami; lutowane w technologii montażu przewlekanego, powierzchniowego, flip chip i inne (rys. 2.10). Zamiast lutowania, elementy SMD można łączyć z użyciem klejów elektrycznie przewodzących, tzn. takich, które umożliwiają nie tylko montaż mechaniczny, ale także transport ładunku elektrycznego.

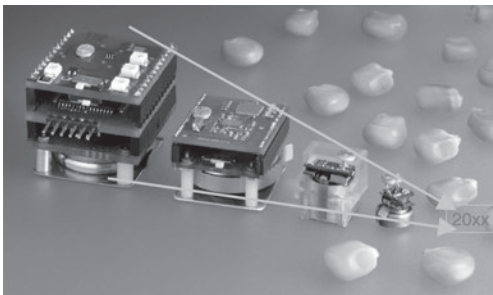
C. Trzeci poziom dotyczy montażu płytek obwodów drukowanych, gotowych mikrosystemów i innych podzespołów na poziomie bloku (kompletnego urządzenia elektronicznego). Na tym poziomie stosowany jest montaż mechaniczny płytek drukowanych i połączenia rozłączne (rys. 2.11).



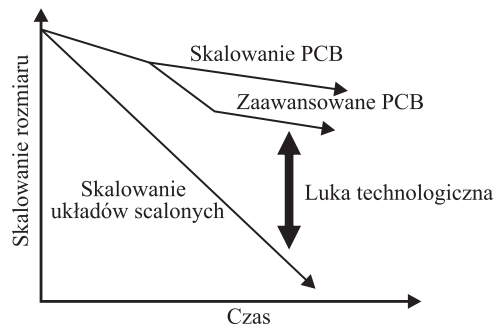
Rys. 2.11. Złącza do połączeń elektrycznych płytek obwodów drukowanych



Rys. 2.12. Zespoły bloków złożonego systemu elektronicznego [8]



Rys. 2.13. Miniaturyzacja – dominujący kierunek rozwoju elektroniki [3]

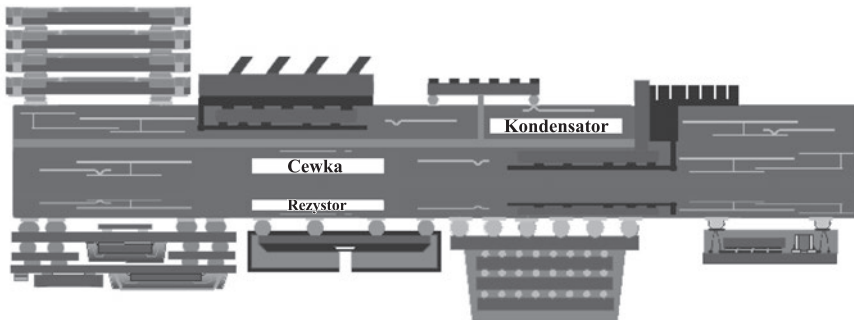


Rys. 2.14. Różnice trendu miniaturyzacji układów scalonych i możliwości standardowego montażu elektronicznego wg [3]

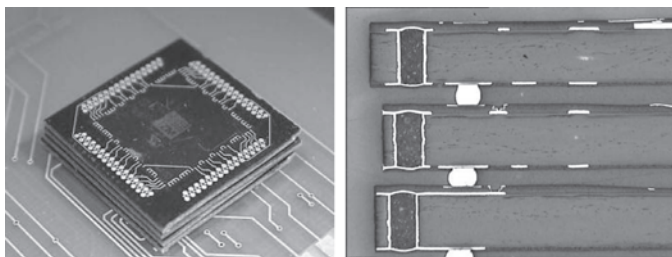
D. Czwarty poziom montażu (niepokazany na rys. 2.4) dotyczy elektrycznego połączenia i mechanicznego złożenia bloków w duży system elektroniczny (rys. 2.12). Podstawą jest montaż mechaniczny, a sygnały elektryczne i zasilanie przesyłane są wiązkami kablowymi. Przeważają połączenia rozłączne.

Dominującym kierunkiem rozwoju elektroniki jest miniaturyzacja (rys. 2.13). Widać to głównie we wzroście skali integracji układów scalonych, liczby wejść/wyjść, szybkości pracy oraz gęstości mocy. Niestety, standardowe technologie montażu elektronicznego nie nadążają za tym trendem i tworzy się luka technologiczna (rys. 2.14) stawiająca pod znakiem zapytania celowość dalszej miniaturyzacji. Mozaika połączeń na powierzchni płytki obwodu drukowanego nie jest na tyle drobna, aby spełnić wymóg gęstości wyprawań układów scalonych. Rozwiązaniem jest montaż przestrzenny (3D).

Przez montaż przestrzenny można rozumieć zarówno montaż pojedynczych struktur na i wewnątrz wielowarstwowych płytek obwodów drukowanych, jak i wielowarstwową strukturę układu lub układów scalonych. Płytki dwustronne są w powszechnym użyciu i coraz częściej stosuje się płytki wielowarstwowe, które zawierają także bierne elementy (nieobudowane) montowane na warstwach wewnętrznych. Przykład pokazano na rysunku 2.15. Na płycie górnej, po stronie lewej widoczny jest zmontowany przestrzennie pakiet czterech elementów. Sposób montażu takiej wertykalnej struktury pokazano na rysunku 2.16.

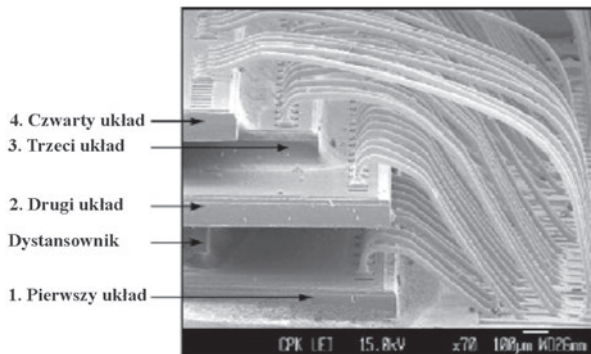


Rys. 2.15. Wielowarstwowa PCB z montażem dwustronnym i elementami wbudowanymi [3]

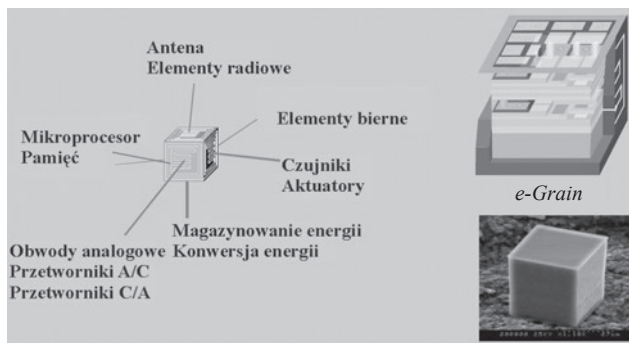


Rys. 2.16. Pakiet czterech elementów ułożonych wertykalnie; po lewej stronie przekrój przez warstwy montowane techniką flip chip [3]

„Jeden na drugim” to sposób, w jaki mogą być montowane także nieobudowane struktury układów scalonych. Przykład takiego pakietu, w którym sygnały przekazane są do kontaktów obudowy połączeniami drutowymi, pokazano na rys. 2.17. Skomplikowany montaż drutowy (także montaż flip chip) może być przyczyną defektów w postaci zwarć lub braku połączeń. Dlatego dąży się do technologii wykonywania funkcjonalnych przestrzennych bloków z połączeniami wewnętrznymi, z wykorzystaniem także powierzchni bocznych. Oznacza to, że liczba połączeń montażowych zewnętrznych jest ograniczona do zasilania zespołu i wyjściowych sygnałów całego zespołu. Koncepcje takiej struktury (heterosystemu), nazwanej *e-Grain* przedstawiono na rys. 2.18.



Rys. 2.17. Pakiet czterech układów scalonych połączonych z wprowadzeniami obudowy montażem drutowym [3]

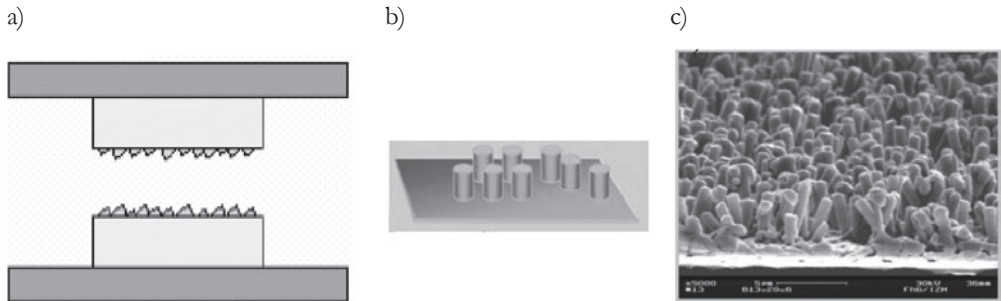


Rys. 2.18. Koncepcja funkcjonalnego zespołu *e-Grain* wg [3]

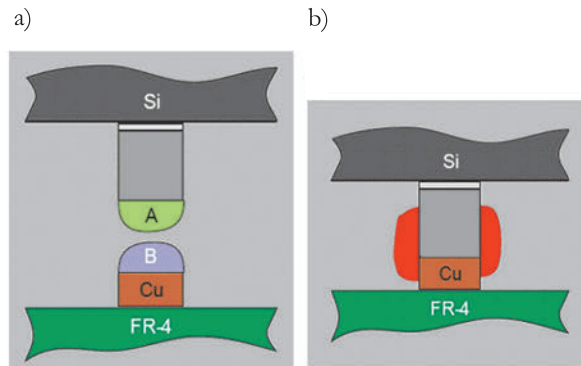
Trwają prace nad wypełnieniem wspomnianej wcześniej (rys. 1.2, 2.14) luki technologicznej. Wymaga to zmniejszenia podziałki połączeń i innych technologicznych rozwiązań – także w skali nanometrowej. Jednym z proponowanych rozwiązań są ultracienkie, stabilne kontakty do montażu powierzchni o wymiarach mikrometrowych. Zasadę tworzenia takich połączeń pokazano na rysunku 2.19. Czynna powierzchnia wykonana jest

z polimeru elektroprowadzącego (np. polypyrrol) lub metalu (Ni, Au i inne). Średnica cylindrycznych struktur może mieć od 10 do 1000 nm.

Innym rozwiązaniem uzyskiwania trwałych połączeń w skali mikro- lub nanometrowej może być użycie reaktywnych związków, które mogą zrealizować połączenie bez dostarczania energii zewnętrznej. Po uzyskaniu kontaktu między aktywnymi chemicznie pokryciami kontaktów (rys. 2.20) następuje reakcja egzotermiczna, której energia jest wystarczająca do stworzenia stałego połączenia.



Rys. 2.19. Ultracienkie kontakty: a) zasady połączenia, b) model aktywnej powierzchni, c) nanostruktura powierzchni Au [3]

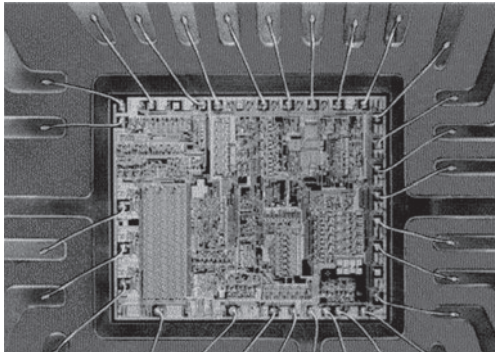


Rys. 2.20. Połączenie z wykorzystaniem energii reakcji egzotermicznej; a) elementy kontaktowe pokryte materiałami aktywnymi chemicznie, b) trwałe połączenie po reakcji [3]

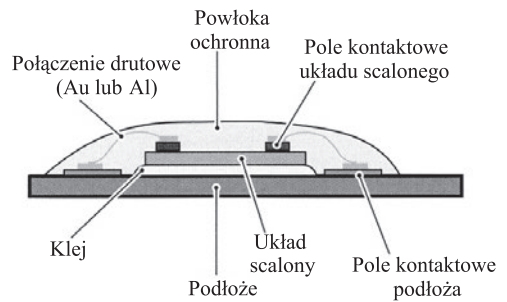
Przy powierzchniach kontaktu o wymiarach mikrometrowych problemem staje się właściwe pozycjonowanie względem siebie łączonych powierzchni. Prowadzi się prace nad samoustawieniem tych powierzchni, wykorzystując siły kapilarne i siły napięcia powierzchniowego.

3. MONTAŻ DRUTOWY

Montaż drutowy stosowany jest do łączenia kontaktów struktur półprzewodnikowych do pól kontaktowych obudowy lub do montażu struktur nieobudowanych (COB) do pól kontaktowych płytki PCB. To tzw. pierwszy (rys. 3.1) i drugi poziom montażu (rys. 3.2).

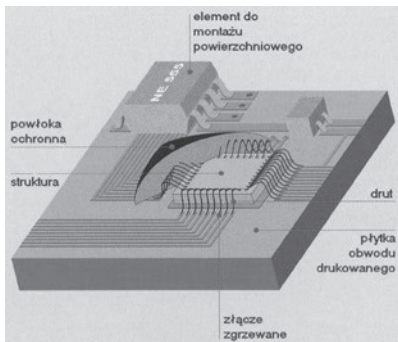


Rys. 3.1. Montaż drutowy; połączenia struktury półprzewodnikowej do kontaktów obudowy [9]

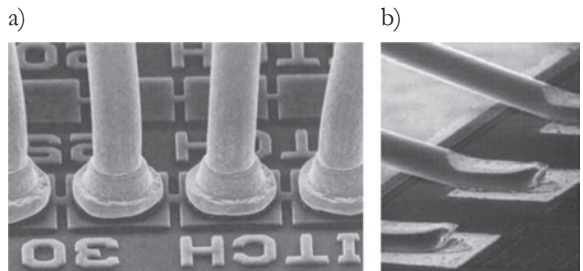


Rys. 3.2. Montaż drutowy; połączenia nieobudowanej struktury do kontaktów PCB [4]

Jak wcześniej wspomniano (rozdz. 2) w drugim stopniu montażu obok typowych elementów w obudowach mogą występować elementy nieobudowane, co pokazano na rys. 3.3. W takiej konstrukcji struktura połączeń drutowych musi być zabezpieczona powłoką ochronną przed narażeniami mechanicznymi i środowiskowymi. Zwykle stosuje się w tym celu polimery utwardzalne (ang. *mold compound*).



Rys. 3.3. Fragment PCB z nieobudowaną strukturą łączoną montażem drutowym [4]

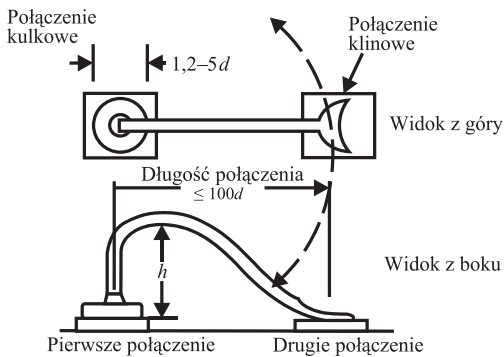


Rys. 3.4. Połączenia: a) kulkowe i b) klinowe [4]

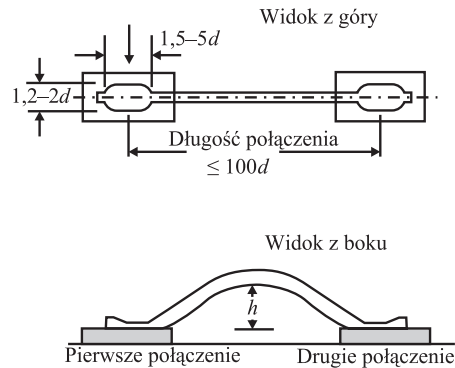
Jednak w szerszym kontekście montaż drutowy oznacza połączenie dwóch powierzchni z użyciem drutu, przy czym stosowana jest tu wyłącznie technologia zgrzewania za pomocą specjalnych głowic, przez które przechodzi drut i różnych kombinacji ciepła, nacisku oraz energii ultradźwiękowej. W zależności od sposobu dostarczania energii wyróżnia się trzy podstawowe technologie:

- zgrzewanie termokompresyjne (ang. *Thermocompression Bonding*),
- zgrzewanie ultradźwiękowe (*Ultrasonic Bonding*), oraz
- zgrzewanie termoultradźwiękowe (*Thermosonic Bonding*).

Efektom zgrzewania może być połączenie kulkowe (ang. *ball bond*) lub połączenie klinowe (*wedge bond*), co pokazano na rys. 3.4. Przy zgrzewaniu termokompresyjnym lub termoultradźwiękowym pierwsza zgrzeina ma postać połączenia kulkowego, a druga – połączenia klinowego w kształcie półksiężyca. Tę parę zgrzein określa się skrótem *ball-wedge* (rys. 3.5). Efektom zgrzewania ultradźwiękowego jest powstanie dwóch jednakowych połączeń klinowych, *wedge-wedge* (rys. 3.6).



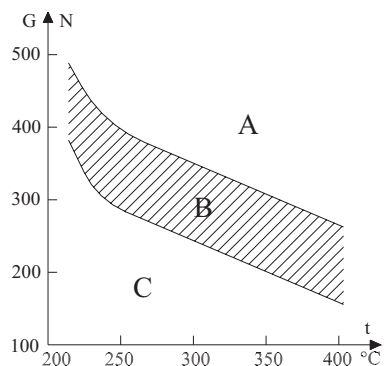
Rys. 3.5. Efekt zgrzewania termokompresyjnego lub termoultradźwiękowego: połączenie *ball-wedge*, d – średnica drutu wg [10]



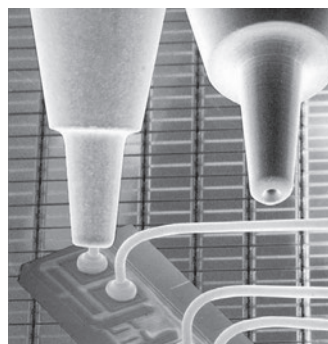
Rys. 3.6. Efekt zgrzewania ultradźwiękowego: połączenie *wedge-wedge*, d – średnica drutu, h – wysokość pętli niższa niż dla zgrzewania *ball-wedge* wg [10]

Zgrzewanie termokompresyjne jest rezultatem kontaktu dwóch metalicznych powierzchni (drut i metaliczna powierzchnia wyprowadzenia) poddanych działaniu ciepła i nacisku w kontrolowanym czasie. Powstanie dostatecznie dużego ciśnienia w obszarze bezpośredniego styku łączonych elementów powoduje plastyczne płynięcie materiałów, dzięki czemu wzrasta rzeczywista powierzchnia styku. Jednocześnie, ze wzrostem temperatury, w obszarze styczności zwiększa się energia atomów łączonych elementów. Następuje dyfuzyjne wnikanie atomów jednego materiału w drugi, w wyniku czego powstaje połączenie mechaniczne, będące wynikiem oddziaływania sił międzycząsteczkowych. Siła docisku i temperatura są podstawowymi, wzajemnie powiązаныmi parametrami procesu łączenia. Na rysunku 3.7 przedstawiono wpływ nacisku wywieranego na łączone elementy oraz temperatury procesu na jakość połączenia. Zastosowanie większej siły podczas zgrzewania umożliwia zmniejszenie temperatury. Stosowanie jednak zbyt dużych sił

może spowodować uszkodzenie kruchej struktury półprzewodnikowej. Obszar B na rysunku 3.7 oznacza zakres sił i temperatury, w jakich powstaje prawidłowa spoina o bardzo dobrych właściwościach wytrzymałościowych. W obszarze C, z powodu braku wystarczającego nacisku, nie powstają odkształcenia plastyczne niezbędne do powstania wytrzymałej spoiny. W obszarze A natomiast, powstają wytrzymałe połączenia, ale zbyt duża siła spowoduje powstanie dużych odkształceń i naprężeń mechanicznych.



Rys. 3.7. Wpływ nacisku i temperatury na jakość połączenia termokompresyjnego:
A, C – połączenia wadliwe,
B – połączenia prawidłowe [11]



Rys. 3.8. Głowica prowadząca drut [4]

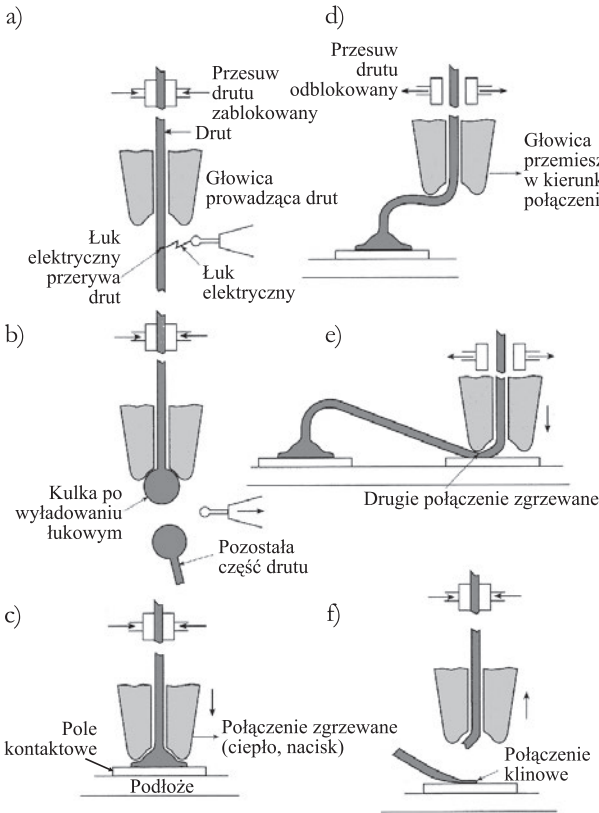
Dobre efekty uzyskuje się, gdy drut i metaliczna powierzchnia wykonane są ze złota. Dobrą dyfuzję uzyskuje się dla pary Al–Au, co oznacza drut ze złota i aluminium metalizację, lub odwrotnie. Druty wykonuje się głównie z czystego złota (z domieszkami na poziomie poniżej 100 ppm), czystego aluminium, aluminium z dodatkiem 1% krzemu, dodatkiem magnezu (0,5–1%) i coraz częściej z dodatkiem miedzi. Średnica drutu może wynosić od 5 μm do 500 μm (dla połączeń przenoszących duże prądy). Należy dodać, że do wykonywania kontaktów podwyższonych technologią flip chip (rozdział 4) stosuje się drut ze złota z dodatkiem ok. 1% palladu.

Temperatura procesu wynosi przeciętnie 300–400 °C, a czas – ułamek sekundy. Drut prowadzony jest w nagrzewanej głowicy z otworem na drut (rys. 3.8), zwykle ceramicznej. Typowy proces przebiega w pięciu etapach (rys. 3.9):

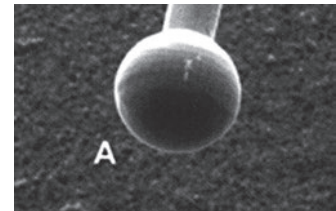
- 1 – formowanie kulki (rys. 3.9a, b),
- 2 – pierwsze zgrzewanie drutu do powierzchni kontaktu (rys. 3.9c),
- 3 – przesunięcie głowicy do pozycji drugiego zgrzewania (rys. 3.9d),
- 4 – drugie zgrzewanie (rys. 3.9e),
- 5 – zerwanie drutu (rys. 3.9f).

Bardzo istotny jest proces formowania kulki. Wyładowanie łukowe pomiędzy specjalną elektrodą i drutem powoduje jego przetopienie, a w konsekwencji zerwanie i uformowanie

regularnych kulek na końcach (rys. 3.10). Średnica kulki jest znacznie większa od otworu głowicy i dzięki temu może zachodzić proces zgrzewania. Ze względu na stosunkowo dużą siłę docisku początkowa kulka zostaje zniekształcona i przybiera kształt końcówki głowicy (rys. 3.4). Analizując proces zgrzewania przedstawiony na rys. 3.9, warto zwrócić uwagę na urządzenie blokujące przesuw drutu w momentach zgrzewania lub zrywania, ale umożliwiające swobodne przemieszczanie się głowicy w innych fazach procesu.



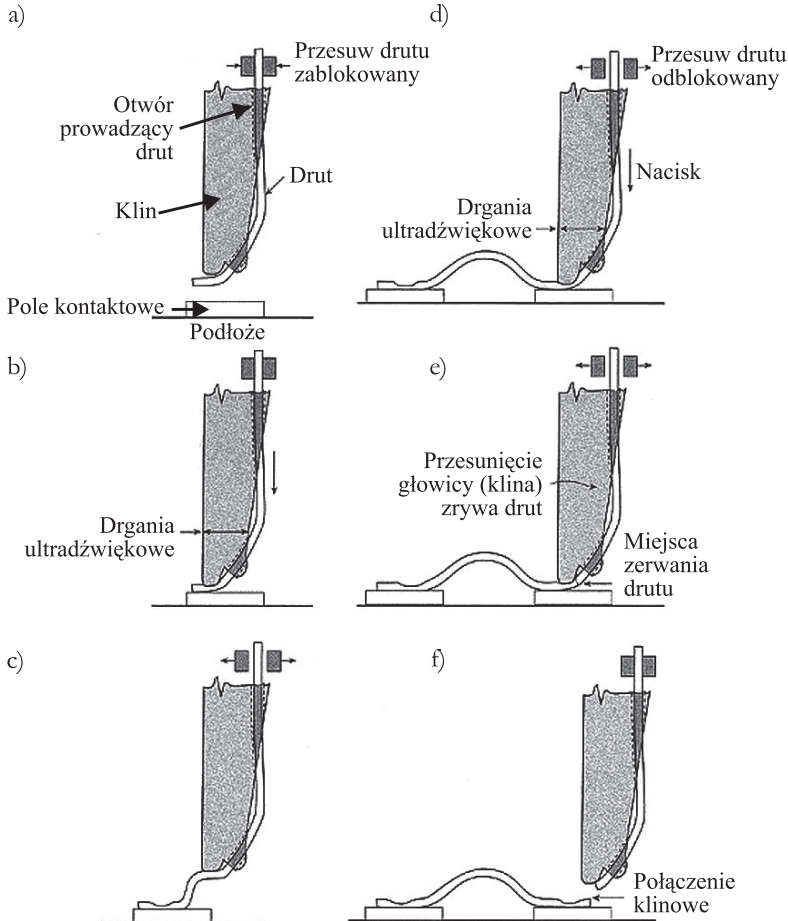
Rys. 3.9. Proces zgrzewania termokompresyjnego (*ball-wedge*) wg [10]



Rys. 3.10. Kulka na końcu drutu po wyładowaniu łukowym [10]

Zgrzewanie ultradźwiękowe odbywa się w niskiej temperaturze, ale wymaga energii ultradźwiękowej – wibracji o częstotliwości od 20 do 300 kHz (zazwyczaj 60 kHz). Energia drgań ultradźwiękowych wywołuje tarcie między łączonymi powierzchniami, powodując lokalny wzrost temperatury, a tym samym zwiększenie amplitudy drgań sieci krystalicznej. Siła dociskająca powoduje powstawanie odkształceń plastycznych w obszarze spoiny, zwiększając jednocześnie powierzchnię kontaktu. Zwiększa się energia kinetyczna atomów powierzchniowych oraz dochodzi do wzajemnej dyfuzji atomów. Na granicy łączonych materiałów powstają wzajemne kryształy, tworząc trwałe połączenie.

Na jakość uzyskanego połączenia mają wpływ takie parametry, jak: częstotliwość i amplituda drgań, siła docisku, czas zgrzewania, twardość i chropowatość powierzchni. Czystość powierzchni nie jest tak ważna, jak przy zgrzewaniu termokompresyjnym, ponieważ tlenki metali oraz zanieczyszczenia są usuwane na skutek drgań powierzchni.



Rys. 3.11. Proces zgrzewania ultradźwiękowego (*wedge-wedge*) [10]

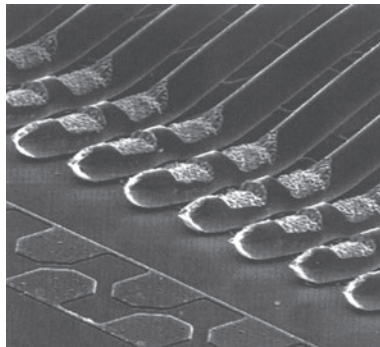
Poszczególne etapy całego procesu zilustrowano na rysunku 3.11. Sam proces zgrzewania można podzielić na dwie fazy. W fazie pierwszej, trwającej około 1 ms, następuje liniowy wzrost siły nacisku. W tym czasie powstają duże odkształcenia plastyczne drutu, dzięki czemu zwiększa się powierzchnia kontaktu. W drugiej fazie dodatkowo dostarczana jest energia ultradźwiękowa (głowica wibruje w płaszczyźnie równoległej do powierzchni kontaktu) i powstaje połączenie. Całkowity proces zgrzewania trwa około 20 ms. Zwykle łączy się drut aluminiowy do podłoża wykonanego z aluminium lub złota. Ze względu na wysoki koszt drut ze złota nie jest powszechnie stosowany.

Podstawową zaletą tej metody zgrzewania jest zdolność do uzyskania wytrzymałych połączeń bez konieczności znacznego nagrzewania łączonych struktur. Zaletą jest też możliwość łączenia bliżej siebie położonych pól kontaktowych, co wynika z wąskich, wydłużonych kontaktów (rys. 3.4).

Zgrzewanie termoultradźwiękowe jest podobne w swojej istocie do zgrzewania termokompresyjnego. Podstawowa różnica polega na tym, że głowica nie jest nagrzewana (lub nagrzewana do znacznie niższej temperatury), a podłoże może być grzane do temperatury 150 °C lub niżej. Dodatkowe ciepło niezbędne do procesu zgrzewania jest wynikiem energii ultradźwiękowej, która jest dostarczona krótkim impulsem (dziesiątki milisekund) do głowicy w momencie kontaktu drutu z polem kontaktowym. Stosowana w procesie zgrzewania siła nacisku jest zazwyczaj znacznie mniejsza niż w zgrzewaniu termokompresyjnym, co umożliwia łączenie mechanicznie nieodpornych struktur. Stosunkowo niska temperatura nie powoduje degradacji kompozycji polimerowych (klejów) i ogranicza ryzyko defektów.

Zgrzewanie termoultradźwiękowe stosowane jest do montażu głównie drutami złotymi, ale możliwe jest także stosowanie drutów aluminiowych, miedzianych i palladowych. Pole kontaktowe może być wykonane ze stopu aluminium, miedzi oraz wielowarstw (np. miedź–nikiel–złoto).

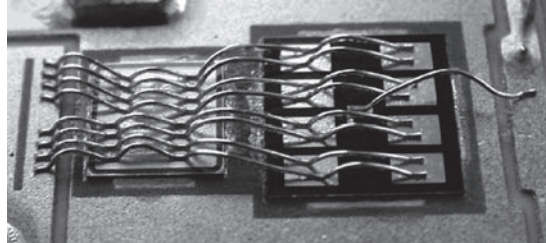
W komercyjnych zastosowaniach połączeń kulkowych podziałka jest zwykle większa od 100 μm . Wynika to z problemów wykonania kapilar o bardzo małych rozmiarach. W specjalnych konstrukcjach możliwe jest tworzenie połączeń o mniejszym odstępnie. Pojawiają się doniesienia o wykonaniu montażu z połączeniami kulkowymi o rozstępie 55 μm oraz z połączeniami klinowymi o podziałce 40 μm (rys. 3.12).



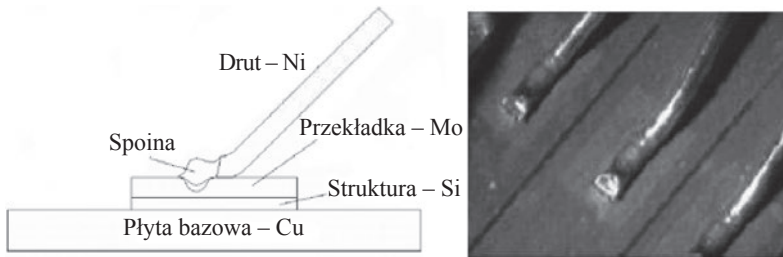
Rys. 3.12. Połączenia klinowe o podziałce 40 μm ; drut ze złota o średnicy 20 μm [10]

Do wykonywania wyprowadzeń w przyrządach mocy stosuje się druty aluminiowe o średnicach nie większych niż 500 μm , o dużej czystości lub z niewielkim dodatkiem niklu, ograniczającym korozję. Ta średnica może być zbyt mała dla transmisji prądów o dużym natężeniu, dlatego połączenie dubluje się (rys. 3.13). Rozwiązaniem alternatywnym

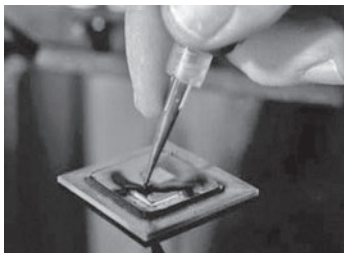
jest stosowanie grubszych drutów i technologii łączenia, z wykorzystaniem źródeł energii o dużej gęstości mocy. Na rysunku 3.14 pokazano przykład montażu wykonanego drutem niklowym o średnicy 1 mm, wtopionym w molibdenową płytkę, stanowiącą osłonę termiczną właściwego kontaktu z zastosowaniem wiązki laserowej jako źródła ciepła.



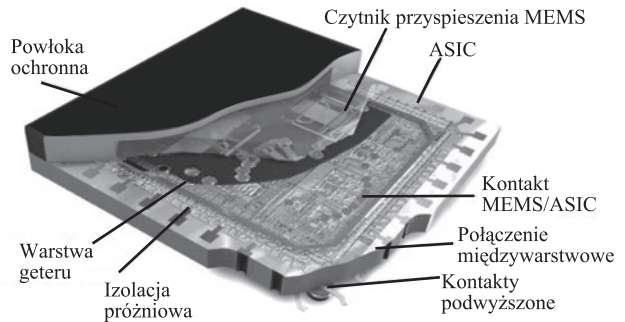
Rys. 3.13. Połączenia drutowe w tranzystorze IGBT [11]



Rys. 3.14. Połączenia drutowe wykonane wiązką laserową [11]



Rys. 3.15. Zabezpieczenie struktury i połączeń drutowych



Rys. 3.16. Zabezpieczenie całego zespołu funkcjonalnego wg [12]

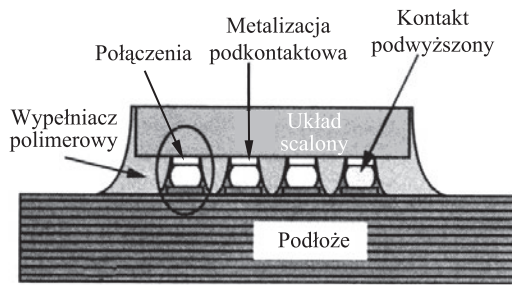
Struktura wraz z system połączeń drutowych musi być zabezpieczona przed działaniem narażeń mechanicznych i środowiskowych. Proces zabezpieczania w języku angielskim określa się jako *moulding*, a materiałem zabezpieczającym są zazwyczaj kompozyty termoutwardzalne wypełnione krzemionką (80–90%). Taki kompozyt ma zbliżoną war-

tość temperaturowego współczynnika rozszerzalności do krzemu, co ogranicza wartość wprowadzanych naprężeń w trakcie procesu. Dodatkowo, zawartość wypełniacza powoduje lepsze odprowadzenie ciepła i chroni strukturę przed penetracją wilgoci.

Po podgrzaniu kompozyt staje się cieczą i w takim stanie jest aplikowany (rys. 3.15), aby następnie przejść (w wyniku polimeryzacji) w stan wiskoelastyczny. W warunkach przemysłowych stosowane jest zaprasowanie przetłoczone. Proces polega na tym, że niezbędną ilość kompozytu, wstępnie ogrzanego, umieszcza się w cylindrze, z którego w postaci całkowicie uplastycznionej, zostaje przetłoczony przez jeden lub więcej kanałów do formy nadającej ostateczny kształt warstwy zabezpieczającej. W wielu przypadkach zabezpieczony zostaje cały zespół funkcjonalny (rys. 3.16).

4. MONTAŻ FLIP CHIP

Na pierwszym i drugim poziomie montażu coraz powszechniej stosuje się połączenia z wykorzystaniem kontaktów podwyższonych wykonywanych techniką flip chip. Strukturą flip chip nazywa się strukturę z wyprowadzeniami sferycznymi, natomiast proces montażu – montażem struktur czołowych. Istota polega na tym, że powierzchniowo rozmieszczone kontakty łączy się bezpośrednio z płytą montażową (rys. 4.1). Technikę tę stosuje się do montażu struktury półprzewodnikowej wewnątrz obudowy, montażu struktur nieobudowanych na płytkach obwodów drukowanych (COB) oraz montażu elementów w obudowach (np. BGA – opis w rozdziale 5) na płytkach PCB.



Rys. 4.1. Istota montażu flip chip wg [5]

Jedną z najistotniejszych zalet techniki flip chip jest niewielka długość ścieżki połączenia. Niska rezystancja i indukcyjność wyprowadzeń predestynuje ten sposób montażu do zastosowań w zakresie wysokiej częstotliwości. Z innych wyróżniających się zalet montażu flip chip można wymienić:

- możliwość zmniejszenia wymiarów struktur przy dużej liczbie połączeń (do 400) wykonywanych w topografii wyprowadzeń matrycowych,
- zwiększenie skuteczności odprowadzenia ciepła przez przeciwną do kontaktów stronę niezabudowanej struktury,
- zwiększenie odporności połączenia na udary i wibracje mechaniczne,
- możliwość jednoczesnego wykonywania setek złączy.

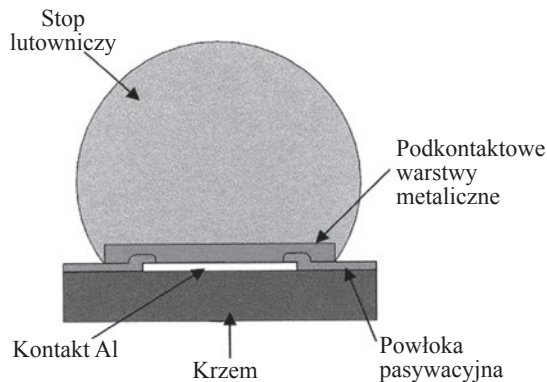
Niewątpliwą wadą połączenia jest brak jego elastyczności (szczególnie w połączeniach lutowanych), co w warunkach niedopasowania współczynników rozszerzalności cieplnych elementu i podłoża może prowadzić do znacznych naprężeń. Z tego powodu wypełnia się szczelinę pomiędzy strukturą i podłożem (zawierającą kontakty) kompozytem na bazie polimeru. Kompozyt o odpowiednio dobranym module sprężystości

przejmuje naprężenia, ograniczając możliwość występowania defektów, a także stanowi ochronę połączeń przed wilgocią i wpływami atmosferycznymi, zwiększa również istotnie mechaniczną wytrzymałość złącza. Takie zabezpieczenie (ang. *underfill*) pokazano na rysunku 4.1. Jeśli struktura jest nieobudowana, dodatkowo zabezpiecza się ją przed narażeniami mechanicznymi i środowiskowymi utwardzalnymi polimerami (ang. *mold compound*), co pokazano na rysunku 3.3. Inne istotne wady to:

- trudność inspekcji jakości ukrytych złączy – konieczność prześwietlania promieniami X,
- słaba kompatybilność procesu z klasycznym montażem powierzchniowym,
- konieczna bardzo duża dokładność montażu, zwłaszcza w wypadku złączy klejonych (przy lutowaniu, wskutek dużego napięcia powierzchniowego może nastąpić „samoustawialność” struktur),

Istotnym elementem złącza jest kontakt (ang. *bump*). Kontakt tworzy elektryczne i mechaniczne połączenie między strukturą i obudową lub płytką obwodu drukowanego oraz stanowi przewodnik do odprowadzenia ciepła ze struktury. W najczęściej stosowanym sposobie montażu, jakim jest lutowanie, kontakt ma formę kropli stopu lutowniczego (rys. 4.2). Kontakty wykonuje się różnymi technikami. Najczęściej są stosowane następujące technologie:

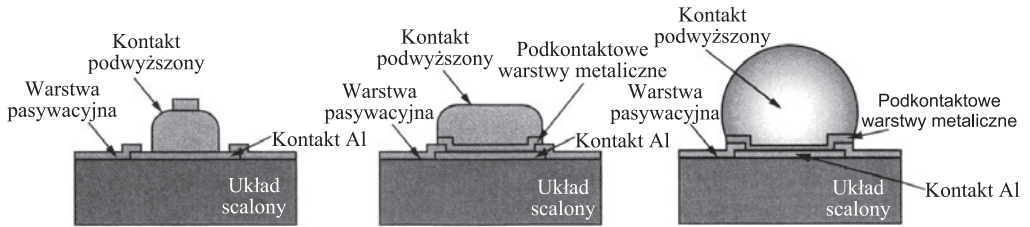
- zgrzewanie kulkowe termokompresyjne,
- pokrywanie galwaniczne lub bezprądowe,
- nanoszenie warstw metodą parowania lub rozpylania,
- drukowanie,
- dozowanie lutu przez „drukowanie strumieniowe” (ang. *jet dispensing*).



Rys. 4.2. Konflikt sferyczny wykonany ze stopu lutowniczego [4]

W efekcie stosowania różnych technologii kształty kontaktów mogą być zróżnicowane (rys. 4.3), ale zawsze tworzą konstrukcje przestrzenne, „wystające” ponad płaszczyzny elementu lub płytki kontaktowej. Z tego względu stosowana jest nazwa „kontakt podwyż-

szony”, w odróżnieniu od płaskich pól kontaktowych. Kontakty podwyższone, w kształcie pokazanym na rys. 4.2, tradycyjnie nazywa się kontaktami sferycznymi.



Rys. 4.3. Przykłady kształtów kontaktów podwyższonych
a) z drutu, b) elektroplaterowany, c) ze stopu lutowniczego wg [5]

W zależności od metody montażu i warunków pracy złącza, kontakty podwyższone mogą mieć różną twardość. Kontakty podwyższone twarde (*rigid bumps*) są zwykle wytworzone z Au, Ag lub ich stopów, a także z podwójnej warstwy Ni–Au. Kontakty te są mało elastyczne, stąd konieczne jest dopasowanie współczynników rozszerzalności termicznej struktury półprzewodnikowej i podłoża. Gdy dopasowanie materiałów jest niemożliwe, jak wyżej wspomniano, wypełnia się szczelinę pomiędzy strukturą i podłożem kompozytem na bazie polimeru. Kompozyt o odpowiednio dobranym module sprężystości przejmuje naprężenia, ograniczając możliwość występowania defektów oraz stanowi ochronę połączeń przed wilgocią i wpływami atmosferycznymi, a także zwiększa mechaniczną wytrzymałość złącza.

Kontakty podwyższone miękkie (*soft bumps*) wykonane są z lutów niskotopliwych, najczęściej na bazie cyny. Wskutek plastycznej deformacji i pełzania naprężenia termiczne znikają w strefie złącza, chociaż po długotrwałych cyklach zmian temperaturowych występują uszkodzenia zmęczeniowe połączeń.

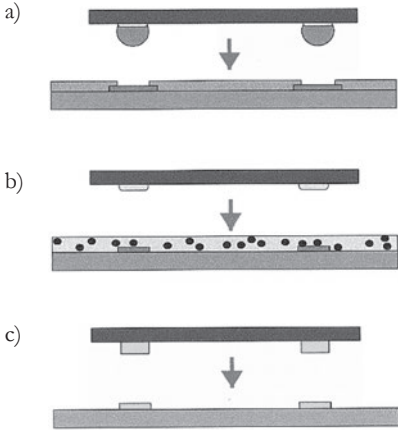
Kontakty podwyższone elastyczne (*elastic bumps*) wytwarzane są jako kontakty polimerowe pokryte warstwą metaliczną. Są one najbardziej odporne na termiczne dylatacje podłoża.

Do połączenia kontaktów podwyższonych z polami na podłożu stosowane są trzy metody montażu (rys. 4.4); lutowanie, klejenie i zgrzewanie termokompresyjne.

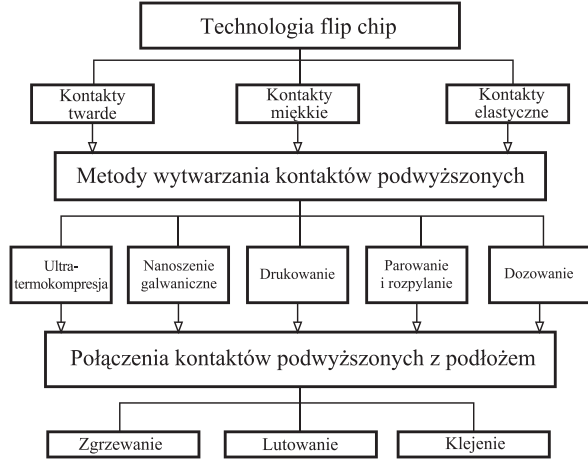
Wybór technologii i materiałów stosowanych w montażu flip chip jest zależny od rodzaju systemów elektronicznych, ich przeznaczenia i warunków pracy. To technologiczne i materiałowe zróżnicowanie pokazano na rys. 4.5.

Przy wykonywaniu kontaktów podwyższonych istotne jest przygotowanie powierzchni struktury półprzewodnikowej. O jakości i niezawodności złączy decydują warstwy, znajdujące się między strukturą a kontaktem podwyższonym. Pierwszą warstwę stanowi powłoka kontaktowa, zwykle wykonana z aluminium (rys. 4.2). Przez powłokę kontaktową przebiega ścieżka prądowa pomiędzy kontaktem i strukturą półprzewodnikową. Strukturę i brzegi warstwy kontaktowej pokrywa cienka powłoka pasywacyjna (rys. 4.2,

4.6). Jej zadaniem jest ochrona struktury przed wilgocią i innymi wpływami środowiska. Zapewnia też izolację elektryczną. Typowe materiały tworzące tę warstwę to azotek krzemu lub tlenek krzemu. Często warstwa pasywacyjna pokryta jest poliimidem, co ma na celu złagodzenie naprężeń.

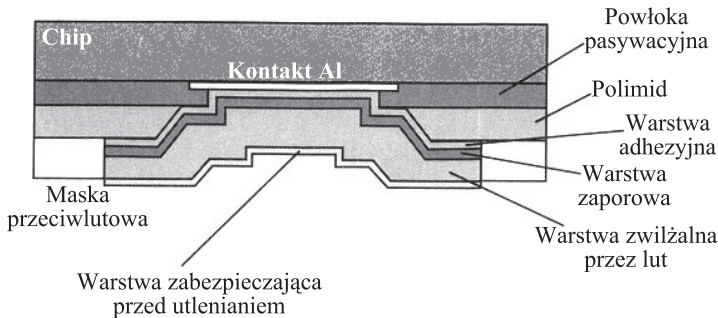


Rys. 4.4. Metody montażu flip chip:
a) lutowanie, b) klejenie,
c) zgrzewanie termokompresyjne [4]



Rys. 4.5. Technologiczne i materiałowe zróżnicowania w montażu flip chip [13]

Istotną rolę odgrywają podkontaktowe warstwy metaliczne (ang. *Under Bump Metallization*, UBM). Przykład zespołu takiej warstwy pokazano na rysunku 4.6. Musi być ona dobrze zwilżana przez materiał kontaktu podwyższonego, a jednocześnie ograniczać jego

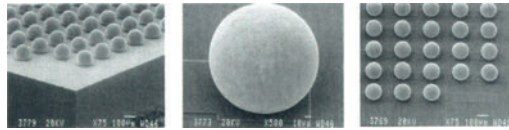


Rys. 4.6. Struktura warstw podkontaktowych wg [5]

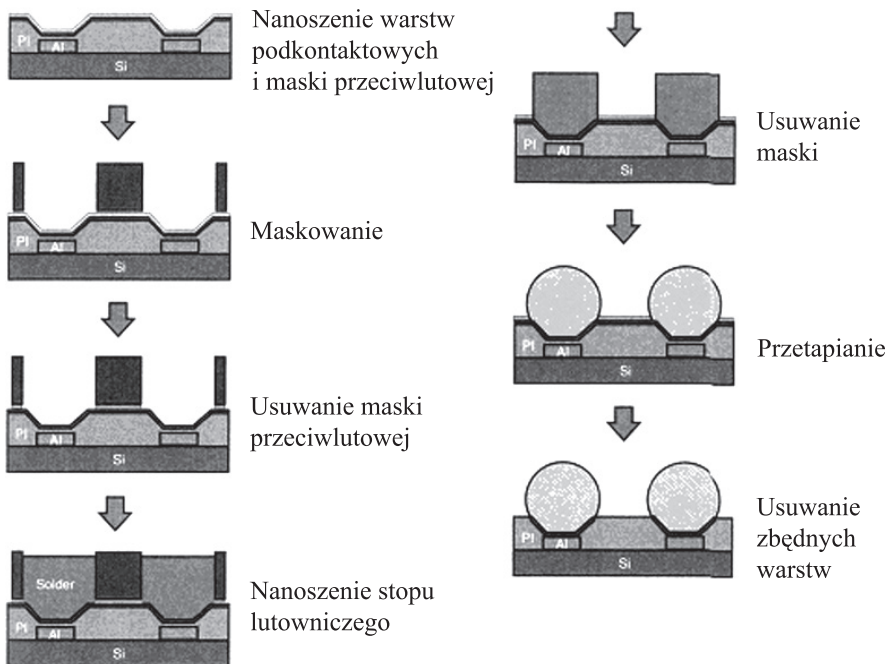
rozpliw poza kontakt. Wymagana jest mała rezystancja elektryczna, dobra adhezja do powłok kontaktowej i pasywacyjnej. Jedna z warstw stanowi barierę przed migracją materiału lutu (głównie cyny) i jednocześnie chroni aluminiowy kontakt przed korozją. W tym celu można stosować warstwę Cr/Cu o grubości ok. 0,15 μm , którą – dla zapewnienia do-

brzo zwilżania – pokrywa się miedzią o grubości ok. 1 μm . Podkontaktowe warstwy metaliczne nanosi się zazwyczaj techniką naporowywania próżniowego lub rozpylania magnetronowego. Można stosować także platerowanie, a więc pokrywanie w sposób trwały warstwy podstawowej cienką folią, co jest wynikiem działania temperatury, odkształcenia plastycznego, ciśnienia lub próżni podczas procesu technologicznego.

Jak wcześniej wspomniano, kontakty podwyższone wykonuje się kilkoma technikami. Przy stosowaniu każdej z tych technik musi zostać utworzona regularna powierzchnia matrycy kontaktów (ang. *area array*), co pokazano na rysunku 4.7. Pierwszym procesem (stosowanym także aktualnie) było naporowywanie. Technika ta wymaga stosowania masek, zwykle wykonanych z molibdenu, natomiast ostateczny kształt kontaktów uzyskuje się po ich przetopieniu. Elektroplaterowanie jest łatwiejsze i tańsze od naporowywania, pozwala także na uzyskanie kontaktów o mniejszej średnicy. Przykład etapów wykonywania kontaktów tą techniką pokazano na rysunku 4.8.

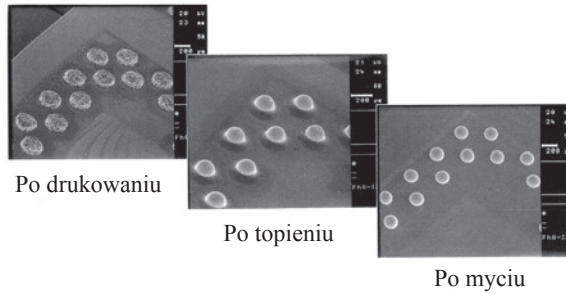


Rys. 4.7. Regularna matryca kontaktów [5]



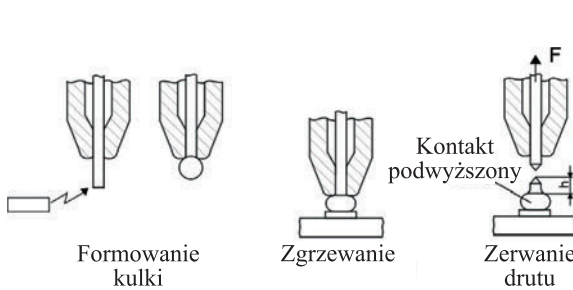
Rys. 4.8. Etapy technologiczne wykonywania kontaktów podwyższonych wg [5]

Formowanie kontaktów metodą drukowania pasty lutowniczej jest chętnie stosowane do wykonywania kontaktów o niezbyt wysokiej temperaturze topnienia. Trudno jest jednak otrzymać regularną matrycę o podziałce poniżej $250\ \mu\text{m}$ (w specjalnych warunkach uzyskano już $80\ \mu\text{m}$). Etapy formowania kontaktów pokazano na rysunku 4.9. Na uwagę zasługuje także technika drukowania strumieniowego *jet-printing*, w której krople roztopionego stopu lutowniczego wyrzucane są w kontrolowany sposób ze specjalnej dyszy w kierunku podłoża, tworząc wymaganą matrycę.

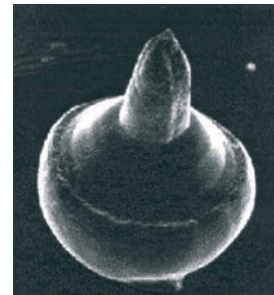


Rys. 4.9. Etapy formowania kontaktów metodą drukowania [4]

Do wytwarzania kontaktów podwyższonych z drutu (*stud bumps*) wykorzystuje się urządzenia i technikę termokompresyjnego montażu drutowego, stosując drut ze złota z dodatkiem ok. 1% palladu. Po uformowaniu pierwszego złącza kulkowego (rys. 4.10) nie tworzy się połączenia z innym polem lutowniczym, tylko w tym miejscu drut jest urywany. W procesie zgrzewania termokompresyjnego wspomaganego drganiem ultradźwiękowymi (zgrze-



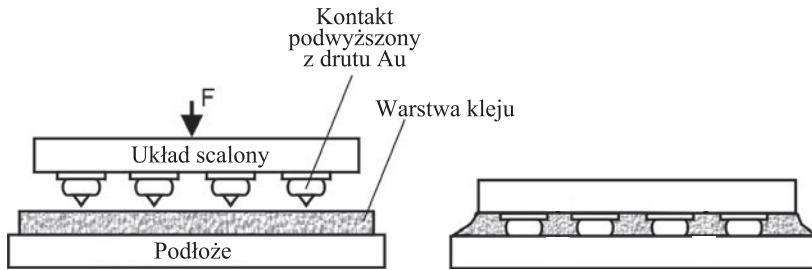
Rys. 4.10. Termokompresyjne formowanie kontaktów podwyższonych (*stud bumps*) z drutu wg [13]



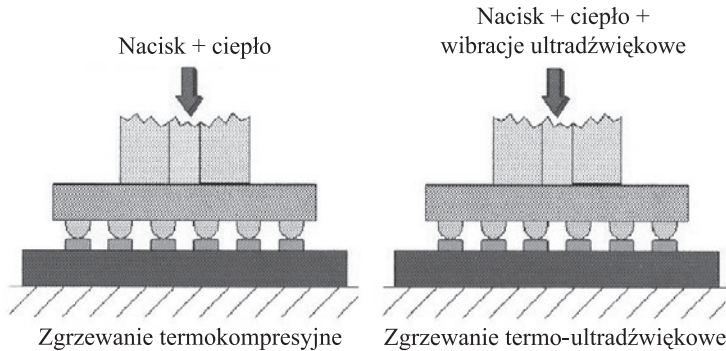
Rys. 4.11. Kontakt podwyższony wykonany z drutu ze złota [7]

wanie termoultradźwiękowe) zostają usunięte tlenki aluminium, dzięki czemu powstaje wytrzymałe złącze oraz dobry kontakt kulki ze złota z polem aluminium. Nie jest wymagane zatem specjalne przygotowanie powierzchni kontaktowej aluminium i tworzenie podkontaktowych warstw metalicznych. Kształt kontaktu *stud bump* pokazano na rysunku 4.11.

Kontakty podwyższone wytworzone w opisany sposób są wygodne do dalszego montażu termokompresyjnego z polami kontaktowymi na podłożu. Wykorzystuje się przy tym folię z kleju izolacyjnego, termicznie zmiękczonej, którą przebijają kontakty podwyższone. Folia klejowa po wystudzeniu kurczy się, co dodatkowo sprzyja uzyskaniu dobrego połączenia (rys. 4.12). Wadą opisanego sposobu wytwarzania podwyższonych kontaktów jest trudność zastosowania tej technologii do produkcji wielkoseryjnej. Typowy raster połączeń wykonanych z drutu Au o średnicy 25 μm wynosi 250 μm , co jest zdeterminowane przez rozmiar kulki (trzykrotna średnica drutu). W procesie zgrzewania można zrezygnować z warstwy kleju, ale wytworzenie połączeń wymaga nacisku i ogrzania do temperatury ok. 300 $^{\circ}\text{C}$ (rys. 4.13). Po ogrzaniu następuje zmięczenie złota i zachodzi dyfuzja pomiędzy kontaktem podwyższonym i metalową powłoką pola kontaktowego. W związku z dużą siłą nacisku metoda ta może być stosowana wyłącznie do sztywnych podłoży (Al_2O_3 , krzem), które dodatkowo muszą charakteryzować się odpowiednią planarnością.



Rys. 4.12. Proces zgrzewania termokompresyjnego kontaktów podwyższonych drutowych z użyciem kleju nieprzewodzącego wg [13]

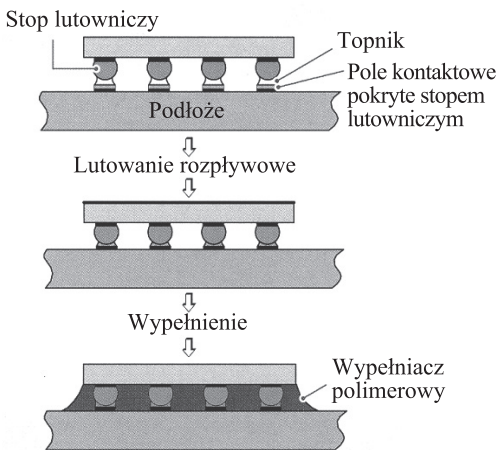


Rys. 4.13. Proces zgrzewania termokompresyjnego i termoultradźwiękowego kontaktów podwyższonych [4]

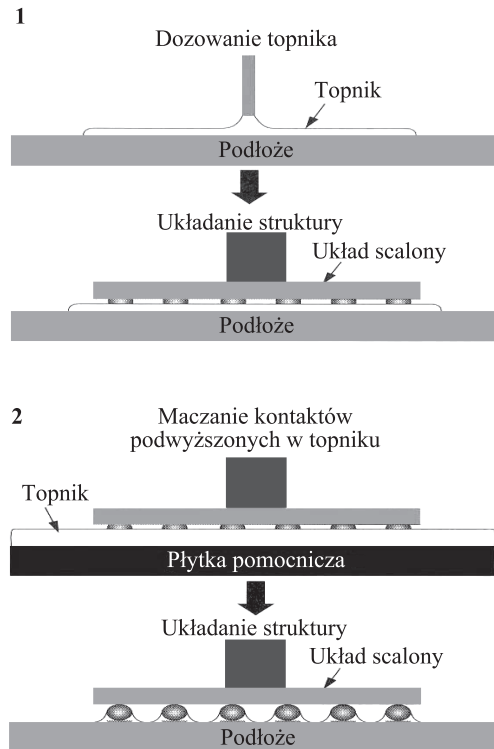
Opisane wcześniej techniki nanoszenia kontaktów podwyższonych ze stopów lutowanych, a szczególnie użyte materiały jednoznacznie wskazują na to, że montaż jest wykonywany w technologii lutownictwa (rys. 4.14). Należy zwrócić uwagę, że ograniczeniem może być konieczność wyeliminowania ołowiu ze składu stopów lutowanych, w zwią-

ku z wejściem w życie przepisów Dyrektywy 2002/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, co wymusiło na producentach sprzętu elektronicznego wprowadzenie montażu bezolowiowego.

Podstawy procesu lutowania szczegółowo omówiono w rozdziale 7, jak również przedstawiona zostanie rola topnika (ang. *flux*) w prawidłowym zwilżaniu lutowanej powierzchni przez stop lutowniczy. Proces lutowania struktur flip chip także wymaga stosowania topników. Mogą być one nanoszone bezpośrednio na powierzchnię pól kontaktowych lub też można zwilżać nimi kontakty podwyższone (rys. 4.15).



Rys. 4.14. Proces lutowania kontaktów podwyższonych wg [4]

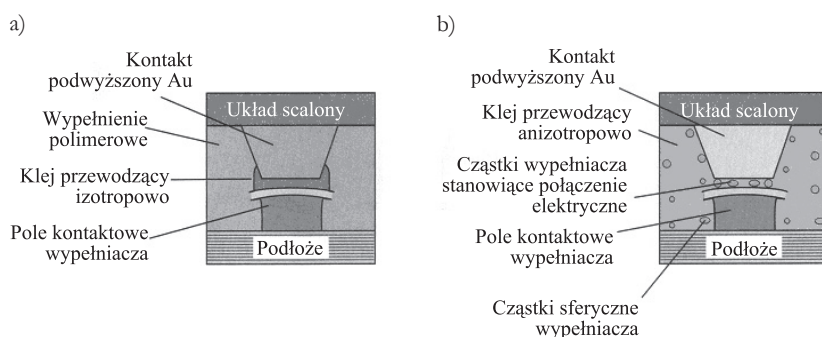


Rys. 4.15. Dwa sposoby nanoszenia topnika przy lutowaniu struktur flip chip [4]

Coraz powszechniej w montażu flip chip stosuje się klejenie jako podstawowy proces technologiczny. Łączenie klejem jest łatwiejsze, nie wymaga topników i mycia struktur po procesie, a temperatura utwardzania polimerowej bazy kleju jest zwykle znacznie niższa od temperatury lutowania. Stosowane są też elektrycznie przewodzące kleje izotropowe lub anizotropowe. W klejach przewodzących izotropowo prąd przepływa we wszystkich kierunkach, tak jak w połączeniach lutowanych. Przepływ prądu możliwy jest dzięki obecności przewodzących cząstek metalu (zwykle płatków srebra) w matrycy polimerowej. Za-

sadę tworzenia takich klejów i ich stosowania w montażu powierzchniowym omówiono w rozdziale 11.

Połączenie kontaktu podwyższonego z polem kontaktowym z zużyciem kleju izotropowego pokazano na rysunku 4.16a. Klej musi być наносzony selektywnie jedynie w miejscach połączenia i nie może przemieszczać się w płaszczyźnie równoległej do łączonych powierzchni, aby nie następowały zwarcia między kolejnymi kontaktami. W tej technologii łączenia stosuje się zwykle kontakty wykonane z drutu ze złota lub pokrywa się złotem powierzchnie kontaktów wykonanych z innych metali. Wynika to z konieczności zabezpieczenia powierzchni przed korozją, która może wystąpić w złączu klejowym. Wzajemne ustawienie łączonych struktur musi być bardziej precyzyjne niż w technologii lutowania. Napięcie powierzchniowe stopionego lutu powoduje, w ograniczonym zakresie, „samoutawianie” łączonych powierzchni, co nie występuje w przypadku klejenia.

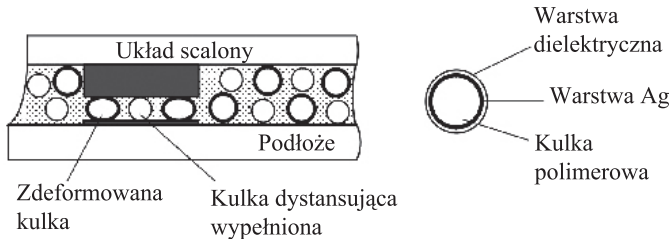


Rys. 4.16. Klejowe połączenia kontaktów podwyższonych z użyciem elektrycznie przewodzącego kleju: a) izotropowego, b) anizotropowego wg [5]

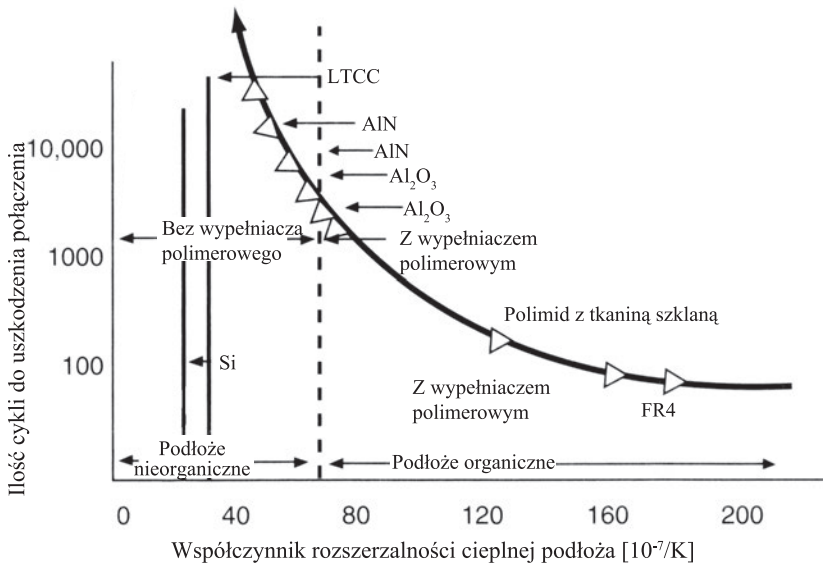
Przy zastosowaniu elektrycznie przewodzącego kleju anizotropowego nie zachodzi obawa zwarć pomiędzy sąsiednimi kontaktami. Klej taki charakteryzuje się tym, że przewodnictwo elektryczne zachodzi tylko w jednym kierunku – między kontaktem podwyższonym a podłożem. Kleje przygotowane są zwykle jako folia o małej zawartości metalicznego wypełniacza, w związku z czym brak jest kontaktu elektrycznego pomiędzy poszczególnymi jego cząstkami. Po umieszczeniu kleju pomiędzy dwoma powierzchniami kontaktowymi i podgrzaniu, przy jednoczesnym docisku, uzyskuje się mikrokontakty cząstek wypełniacza z tymi powierzchniami (rys. 4.16b). W kierunkach poprzecznych do przyłożonej siły docisku cząstki w dalszym ciągu są izolowane materiałem matrycy. Przepływ prądu elektrycznego zapewnia pojedyncza warstwa cząstek wypełniacza. Z tego względu cząstki te powinny mieć kształt sferyczny o identycznych rozmiarach i dodatkowo łatwo ulegać odkształceniom przy docisku. Właściwości takie mają elastyczne cząstki pokryte warstwą elektrycznie przewodzącą. Najbardziej popularne są polimerowe kulki pokryte niklem, a następnie cienką warstwą czystego złota. Stabilność wytworzonych w ten sposób połączeń można uży-

skąć wtedy, gdy żywica, która stanowi matrycę kleju, nie będzie zwiększać swojej objętości wskutek termicznej rozszerzalności czy higroskopijności.

Udoskonaleniem przedstawianej metody jest zastosowanie polimerowych, elastycznych kulek, pokrytych najpierw cienką warstwą ze złota, a później warstwą plastycznego dielektryka. Kulki poddane naciskowi ulegają elastycznej deformacji i tracą izolację (rys. 4.17). Elastyczne naprężenie w kulkach zapewnia ciągły kontakt nawet wówczas, gdy wskutek zmian temperatury nastąpi zwiększenie objętości żywicy. Aby zapewnić stały dystans między łączonymi kontaktami podłoża i struktury, w matrycy polimerowej umieszcza się dodatkowo kulki dystansujące zrobione z twardego dielektryka o średnicy mniejszej od kulek elastycznych.



Rys. 4.17. Schemat montażu flip chip za pomocą kleju anizotropowego z elastycznymi kulkami [13]



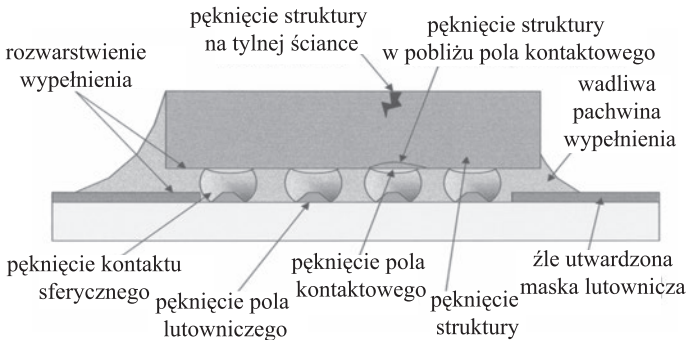
Rys. 4.18. Wytrzymałość połączenia (*mean time to fatigue failure*) struktury krzemowej z podłożem o różnych wartościach współczynnika rozszerzalności cieplnej wg [5]

Ten sposób połączeń flip chip wymaga płaskiej powierzchni łączonych kontaktów. Technologicznie korzystniejszym wariantem montażu z użyciem klejów anizotropowych jest za-

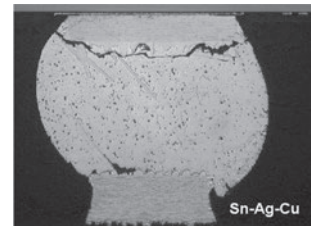
stosowanie anizotropowo przewodzącej folii (ang. *anisotropic conductive foil*, ACF), ale można także aplikować klej w formie plastycznej masy (*anisotropic conductive adhesive*, ACA). Metoda łączenia klejami anizotropowymi pozwala uzyskać podziałkę kontaktów równą 80–100 μm dla elastycznych kulek o średnicy 7–10 μm .

Technologia montażu flip chip została wprowadzona w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Obecnie jest uważana za mniej kosztowną i bardziej niezawodną niż montaż drurowy. Uzyskanie dużej niezawodności wymaga wprowadzania wypełnień polimerowych (*underfill*) do łagodzenia naprężeń wynikających z niedopasowania współczynników rozszerzalności cieplnej (*coefficient of thermal expansion*, CTE) łączonych materiałów. Na rysunku 4.18 pokazano średni czas (liczba cykli), w jakim dochodzi do uszkodzenia połączenia struktury krzemowej z podłożem. Jak widać krzem, którego współczynnik CTE wynosi około $3 \cdot 10^{-6}/\text{K}$, może dobrze współpracować z podłożami szklanymi niskotemperaturowo współwypalaną ceramiką (LTCC) bez stosowania wypełnień polimerowych. Należy jednak pamiętać, że połączenia z materiałami organicznymi o znacznie większych wartościach CTE takich wypełnień wymagają.

Obserwuje się różne defekty wynikające z niedopasowania współczynników rozszerzalności cieplnej (rys. 4.19). Najgorsze skutki przynoszą defekty powodujące przerwanie obwodu elektrycznego, co może nastąpić w czasie pęknięcia kontaktu podwyższonego (4.20).



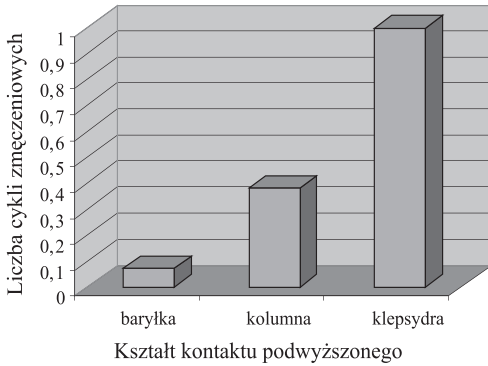
Rys. 4.19. Defekty połączenia flip chip związane z niedopasowaniem współczynników rozszerzalności cieplnej [4]



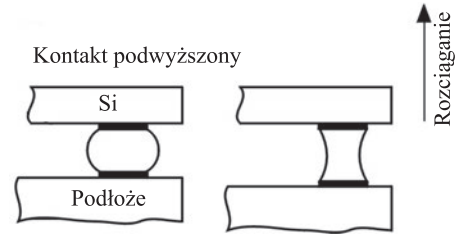
Rys. 4.20. Przekrój przez kontakt podwyższony ujawniający pęknięcie [14]

Modelowanie numeryczne wykazało, że kształt kontaktu ma istotne znaczenie dla jego wytrzymałości. Wyniki symulacji pokazano na rysunku 4.21. Jak widać kształt hiperboliczny kontaktu opisany jako klepsydra (taki kształt pokazano na rys. 4.22) jest znacznie bardziej korzystny od kształtu sferycznego (baryłki) czy też kolumny o stałej średnicy. Dla uzyskania takiego kształtu i uelastycznienia połączeń w procesie lutowania struktura jest unoszona w kontrolowany sposób, aby roztopiony stop lutowniczy uzyskał formę klepsydry i pozostał w takim kształcie po zastygnięciu (rys. 4.22).

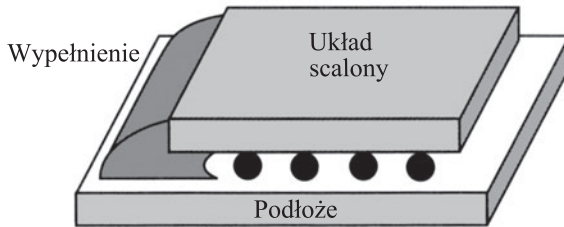
Polimerowe wypełnienie przestrzeni między łączonymi strukturami chroni kontakty przed uszkodzeniami mechanicznymi, ogranicza dostęp wilgoci i czynników korozyjnych i,



Rys. 4.21. Symulacja wytrzymałości zmęczeniowej kontaktów podwyższonych o różnych kształtach [15]



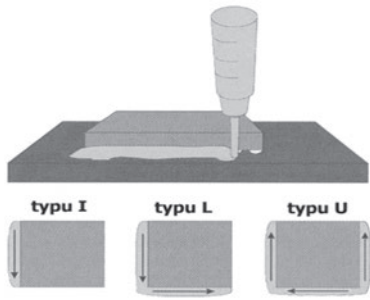
Rys. 4.22. Tworzenie kontaktów hiperbolicznych [13]



Rys. 4.23. Kapilarne wpływanie kompozytu w strefę połączeń flip chip wg [5]

co istotne, kompensuje niedopasowanie współczynników CTE materiałów struktury i podłoża. Najprostszym sposobem wypełnienia jest samoistny przepływ kapilarny kompozytu z dozownika (rys. 4.23). Kompozyt zawiera żywicę (zazwyczaj epoksydową) o małej lepkości ($< 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ w temperaturze pokojowej, co jest warunkiem przepływu kapilarnego), wypełniacz, utwardzacz oraz różne dodatki. Wypełniacz stosuje się w celu dostosowania współczynnika CTE kompozytu do wartości tego współczynnika materiału kontaktów. W lutowanych połączeniach flip chip najczęściej jest to krzemionka SiO_2 o wielkości cząstek pojedynczych mikrometrów, której waga stanowi ok. 65% kompozytu. W takich warunkach wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej kompozytu wynosi $22 \cdot 10^{-6}/\text{K}$. Dodatki to barwniki, katalizatory umożliwiające szybsze utwardzanie, promotory adhezji, środki powierzchniowo czynne zapewniające szybsze wnikanie kapilarne i lepsze zwilżanie powierzchni. Przewodność cieplna takiego kompozytu wynosi ok. $0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, rezystywność – $1013 \Omega\cdot\text{cm}$, a moduł sprężystości (Younga) – $9,8 \text{ GPa}$. Po zakończeniu procesu napełniania przestrzeni (o wysokości ok. $25 \mu\text{m}$) kompozyt jest utwardzany w podwyższonej temperaturze, nie wyższej od temperatury topnienia materiału kontaktów ($130\text{--}175 \text{ }^\circ\text{C}$).

Istnieje kilka konfiguracji dozowania kompozytu (rys. 4.24). Wybór odpowiedniej konfiguracji jest istotny do uzyskania pełnego wypełnienia, należy bowiem pamiętać,

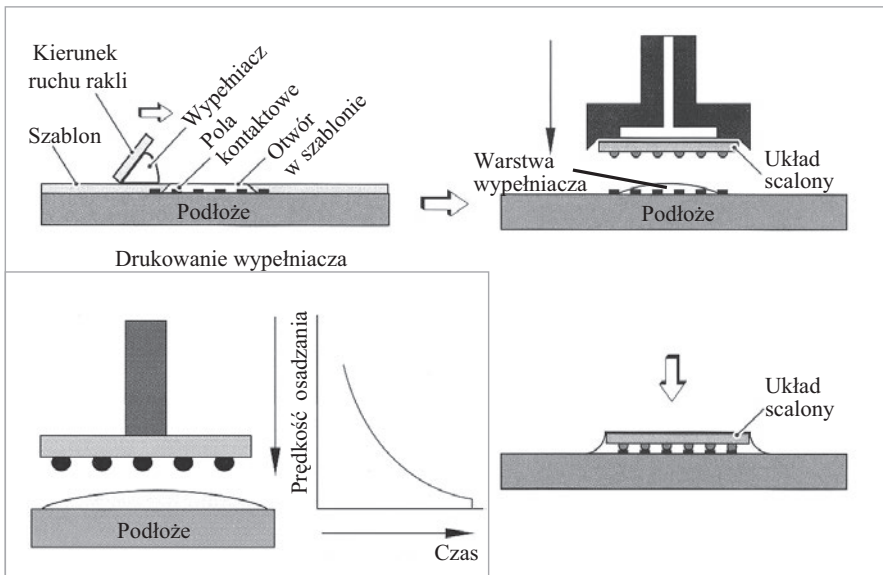


Rys. 4.24. Konfiguracje dozowania kompozytu [4]



Rys. 4.25. Możliwość uwężnienia powietrza przy niewłaściwej konfiguracji dozowania kompozytu [4]

że kapilarny przepływ kompozytu może zatrzymywać pęcherze nieusuniętego powietrza (rys. 4.25). Wady te są ujawniane w czasie testowania połączeń z użyciem skaningowego mikroskopu akustycznego.



Rys. 4.26. Proces „no-flow” wprowadzenia kompozytu w obszar połączeń flip chip [4]

Wielkoseryjna produkcja wymaga krótkiego czasu procesu (lub łączenia kilku procesów) i obniżania kosztów. Wobec zwiększania powierzchni łączonych struktur procesorów oraz minimalizacji przestrzeni kontaktów flip chip (< 25 μm), naturalny (kapilarny) przepływ wypełniającego kompozytu, a następnie konieczność jego utwardzania dramatycznie ograniczają spełnienie tych wymagań. Z tego względu na wydajnych liniach montażowych wprowadza się system bezprzepływowy („no-flow”) wprowadza-

nia kompozytu. Kolejne etapy tego procesu pokazano na rysunku 4.26. Ściśle określona porcja kompozytu jest drukowana szablonowo na obszar kontaktów podłoża. Następnie pozycjonowany jest element zawierający kontakty sferyczne wykonane ze stopu lutowniczego. Kontakty dotykają odpowiadających im pól kontaktowych na podłożu, a ciekły kompozyt wypełnia przestrzeń między podłożem i elementem. W ostatnim etapie złącze jest poddane działaniu wysokiej temperatury, co prowadzi do lutowania i utwardzania kompozytu. Procesy nie zachodzą jednak współbieżnie. Skład kompozytu, a szczególnie jego dodatki wstrzymują utwardzanie aż do osiągnięcia temperatury powyżej temperatury lutowania. Tak więc lutowanie (dokładniej stopienie lutu) poprzedza utwardzenie kompozytu wypełniającego.

5. ELEMENTY, OBUDOWY, ARCHITEKTURA WYPROWADZEŃ

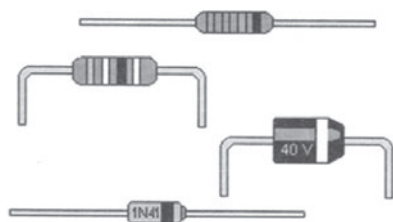
Klasyfikując poziomy montaż, zdefiniowano, że drugi poziom dotyczy montażu nieobudowanych i obudowanych struktur układów scalonych, podzespołów biernych i mikrosystemów na płytkach obwodów drukowanych. W produkcji seryjnej unika się montażu struktur nieobudowanych, kładąc nacisk na wydajny i precyzyjny montaż z użyciem automatów. Wymaga to posługiwania się zunifikowanymi elementami i obudowami do montażu. Również lutowanie ręczne, które stanowi ważny element w bezołowiowym procesie montażu elektronicznego, wymaga takich obudów, szczególnie przy wykonywaniu poprawek montażowych lub napraw zmontowanego zespołu na płycie obwodu drukowanego.

Wszystkie montowane elementy lub zespoły, ze względu na typy obudów oraz liczbę i architekturę wyprowadzeń można podzielić na:

- elementy czynne i biernie do montażu przewlekanego,
- elementy biernie do montażu powierzchniowego,
- układy scalone o zróżnicowanej architekturze wyprowadzeń.

5.1. ELEMENTY CZYNNE I BIERNE DO MONTAŻU PRZEWLEKANEGO

Elementy do montażu przewlekanego oznacza się akronimem TMD (ang. *Through Mount Device*). Pojedyncze elementy (rezystory, kondensatory, diody, cewki, dławiki) do montażu przewlekanego mają dwa wyprowadzenia osiowe lub wyprowadzenia usytuowane jednostronnie, nazywane także radialnymi. Podzespoły cylindryczne (osiowe) mają kształt walca z wyprowadzeniami w jego osi (rys. 5.1). Elementy te są przeznaczone głównie do obsadza-

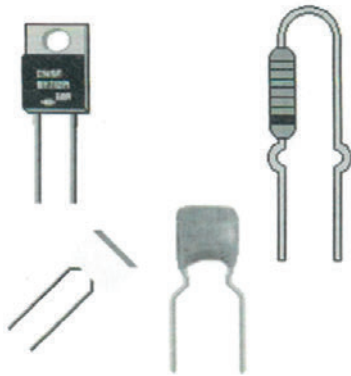


Rys. 5.1. Elementy do montażu przewlekanego z wyprowadzeniami osiowymi [5]

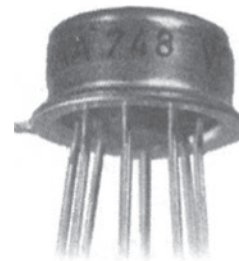
nia ręcznego na płytkach obwodów drukowanych, a następnie lutowania ręcznego bądź na fali. Po uprzednim zagięciu wyprowadzeń elementy te obsadzone są także automatycznie i lutowane na fali. Stosunkowo długie wyprowadzenia dają pewną dowolność w rozmiesz-

czeniu ich punktów lutowniczych. Są one wykonywane z drutów, zwykle miedzianych, o średnicach od 0,38 do 0,81 mm, pokrywanych materiałem o dobrej zwilżalności.

Do obsadzania ręcznego, ale także i automatycznego przeznaczone są elementy o wyprowadzeniach jednostronnych (rys. 5.2). Mogą one mieć różne kształty, ale wspólną ich cechą jest to, że mają wyprowadzenia umieszczone po jednej stronie obudowy. Wyprowadzenia są do siebie równoległe, a odległość między nimi znormalizowana; jest ona wielokrotnością (rzadziej ułamkiem) wymiaru charakterystycznego równego 0,1 cala (2,54 mm). Taką konstrukcję wyprowadzeń mają rezystory, wiele typów kondensatorów, a także niektóre elementy półprzewodnikowe, takie jak diody (także diody świecące), niektóre modele cewek i dławików. Duże elementy, o masie przekraczającej 7 gramów na jedno wprowadzenie, wymagają dodatkowego mechanicznego mocowania do płytek. Są to kondensatory o dużych pojemnościach, transformatory lub filtry.



Rys. 5.2. Elementy do montażu przewlekanego z wyprowadzeniami jednostronnymi [5]



Rys. 5.3. Układ scalony w obudowie kubeczkowej [16]

Należy także wspomnieć o niemal nieużywanych już wielowyprowadzeniowych elementach do montażu przewlekanego. To przede wszystkim tranzystory i układy scalone umieszczone np. w hermetycznej obudowie kubeczkowej z wyprowadzeniami umieszczonymi na jednym z boków (rys. 5.3).

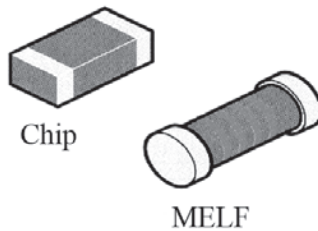
5.2. ELEMENTY BIERNE DO MONTAŻU POWIERZCHNIOWEGO

Podstawowe wymagania, jakie powinny spełniać elementy do montażu powierzchniowego (ang. *Surface Mount Device*, SMD) są następujące:

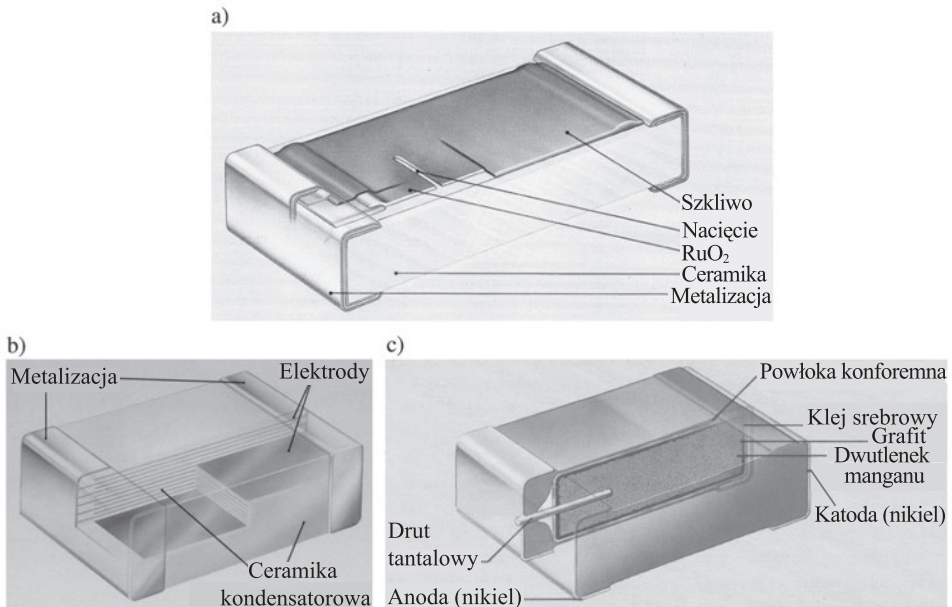
- wyprowadzenia elementu muszą umożliwiać montaż na powierzchni płytki PCB (a nie w otworze),
- kontakty powinny być łatwo i dobrze zwilżane przy lutowaniu,

- kształty i wymiary podzespołów muszą być zunifikowane i dostosowane do montażu automatycznego,
- korpus elementu powinien być zwarty, bez zagłębień i odporny na mycie rozpuszczalnikami lub wodą,
- konstrukcja musi być odporna na naprężenia wynikłe z narażeń mechanicznych i cieplnych w trakcie lutowania.

Podzespoły bierne SMD mają zwykle kształt prostopadłościanu (typu chip), chociaż stosuje się także elementy cylindryczne MELF (ang. *Metal Electrode Face Bonding*), co pokazano na rysunku 5.4. Polskie Normy zalecają stosowanie pełnych nazw, odpowiednio „podzespół prostokątny z wyprowadzeniami metalowymi” oraz „podzespół kołpakowy cylindryczny”.

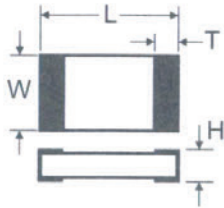


Rys. 5.4. Podzespoły bierne do montażu powierzchniowego typu chip i MELF [4]



Rys. 5.5. Elementy bierne SMD typu chip; przykłady budowy wewnętrznej: a) rezystor, b) kondensator ceramiczny, c) kondensator tantalowy wg [9]

Podzespoły typu chip to rezystory, różnego typu kondensatory, cewki indukcyjne, bezpieczniki i inne. Przykłady konstrukcji takich elementów pokazano na rysunku 5.5. Jak można zauważyć, wyprowadzenia elementów są umieszczone na węższych krawędziach i zintegrowane z korpusem podzespołu. Ze względu na montaż istotne znaczenie ma powłoka finalna wyprowadzenia – warstwa metalu, która zapewnia prawidłową lutowność. Najczęściej są stosowane powłoki Ni/Pd, Ni/Pd/Au, Sn, Sn/Bi, SnAg, Au, a w wyjątkowych przypadkach także SnPb.



Rys. 5.6. Wymiary podzespołu prostokątnego z wyprowadzeniami metalowymi [16]

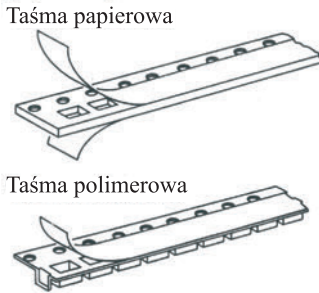
Znormalizowanymi wymiarami podzespołu są długość L i szerokość W (rys. 5.6). Pozostałe wymiary (wysokość H , szerokość kontaktów T) nie są podawane w wymaganiach wymiarowych, zależą bowiem od innych czynników, takich jak moc znamionowa, rezystora czy pojemność kondensatora. Znormalizowane, podstawowe wymiary oznacza się czterocyfrowym zapisem (np. 0805). Dwie pierwsze cyfry określają w przybliżeniu długość podzespołu w setnych częściach cala ($08 = 0,08''$, czyli 2,00 mm), natomiast dwie ostatnie – szerokość ($05 = 0,05''$, czyli 1,25 mm). Nie jest to bezwzględna reguła, bo na przykład element oznaczony jako 0603 ma rozmiary $0,063'' \times 0,031''$ czyli długość 1,6 mm i szerokość 0,8 mm. W tabeli 5.1 podano wybrany zakres rozmiarów (w milimetrach) rezystorów SMD.

Tabela 5.1. Wybrany zakres rozmiarów rezystorów SMD, mm

Oznaczenie	0201	0402	0603	0805	1206	1210	1806	1812
Rozmiar	0,6×0,3	1,0×0,5	1,6×0,8	2,0×1,25	3,2×1,6	3,2×2,5	4,5×1,6	4,5×3,2

Po wyprodukowaniu elementy do montażu powierzchniowego pakowane są do podajników lub części do szpulowych zasobników taśmowych, które są bezpośrednio instalowane w automatach montażowych. Na rysunku 5.7 pokazano taśmy takich zasobników. W gniazdach umieszczane są elementy, a perforacja bliżej krawędzi taśmy zapewnia kontrolowany przesuw zasobnika w celu zapewnienia powtarzalnych sekwencji montażowych. Szerokość taśmy i profil gniazda jest dostosowany do rodzaju pakowanych elementów.

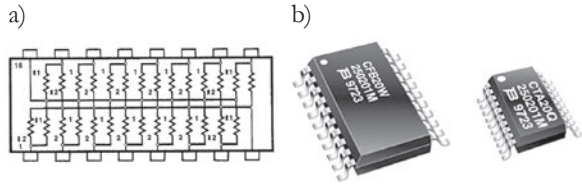
Przytoczone przykłady nie wyczerpują oczywiście wszystkich możliwych geometrii elementów biernych. Szczególnie kondensatory elektrolityczne czy elementy indukcyjne mogą mieć inny kształt, ale w każdym wypadku wymagane jest, aby wyprowadzenia elementu umożliwiały montaż na powierzchni płytki obwodu drukowanego.



Rys. 5.7. Taśmy szpulowych zasobników na elementy SMD [4]



Rys. 5.8. Potencjometry do montażu powierzchniowego [9]



Rys. 5.9. Zintegrowane elementy bierne wielokontaktowe (np. sieć rezystorów) [4]: a) schemat, b) wygląd

Inną architekturę kontaktów mają elementy wielokontaktowe. Do tej grupy można zaliczyć potencjometry o zróżnicowanym kształcie (rys. 5.8), czy też zintegrowane elementy bierne, jak na przykład sieci rezystorów (rys. 5.9).

5.3. OBUDOWY UKŁADÓW SCALONYCH

Obudowa układu scalonego to podzespół, wewnątrz którego umieszczone są struktury półprzewodnikowe połączone mechanicznie z metalowym ażurowym lub podstawą montażową. Dla transmisji sygnałów elektrycznych i zasilania, kontakty struktur połączone są z kontaktami wewnętrznymi obudowy, które po stronie zewnętrznej stanowią wyprowadzenia (rys. 5.10). Całość jest hermetyzowana, a odprowadzenie ciepła z obudowy zapewnia jej korpus albo też dodatkowe wyprowadzenia połączone mechanicznie i cieplnie ze strukturą. Zadaniem elementów obudowy jest:

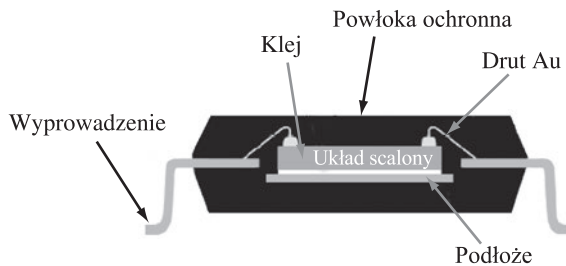
- doprowadzenie zasilania do struktury półprzewodnikowej,
- przesyłanie sygnałów wejściowych i wyjściowych do struktury,
- odprowadzenie ciepła,
- zabezpieczenie struktur przed wpływem narażeń środowiskowych.

Istotne są następujące cechy obudowy:

- kształt i usytuowanie wyprowadzeń określające sposób montażu (przewlekany, powierzchniowy),
- liczba, kształt i architektura wyprowadzeń,
- materiał i rodzaje powłok wyprowadzeń (co decyduje o lutowności),

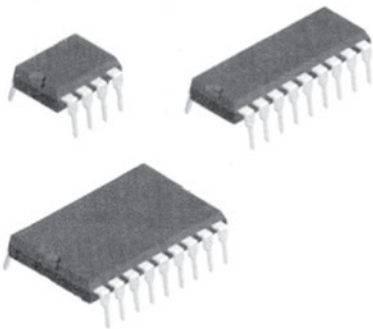
- rodzaj materiału obudowy określający jej odporność środowiskową oraz zdolność do odprowadzania ciepła,
- ciężar elementu.

Dodatkowo można przeprowadzić podział, opierając się na kryterium montażu wewnątrz obudowy. Połączenia elektryczne wewnątrz obudowy wykonuje się najczęściej jako połączenia drutowe lub połączenia flip chip oraz znacznie rzadziej jako połączenia typu TAB. Przy wymaganej dużej szybkości działania układów scalonych korzystniejsze jest stosowanie połączeń typu flip chip ze względu na uzyskiwane małe wartości pojemności i indukcyjności dla tego typu połączeń.

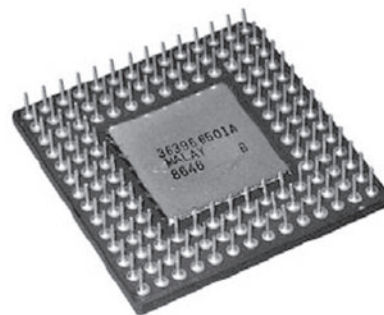


Rys. 5.10. Elementy konstrukcyjne obudowy układu scalonego

Do montażu przewlekane stosuje się prawie wyłącznie obudowy o stosunkowo niewielkiej liczbie wyprowadzeń. Zwykle są to obudowy dwurzędowe (ang. *Dual In Line*, DIL, lub *Dual In line Package*, DIP), rzadziej obudowy jednorzędowe (*Single In line Package*, SIP). Obudowy DIL (rys. 5.11) mają kształt prostopadłościanu z wyprowadzeniami wzajemnie równoległymi, ułożonymi wzdłuż dłuższych boków i prostopadłymi do płaszczyzny obudowy. Wyprowadzenia, prostokątne w przekroju, mają rozmiary $0,3 \times 0,5$ mm i długość od 3 do 4 mm. Ograniczona długość obudowy limituje liczbę



Rys. 5.11. Obudowy dwurzędowe do montażu przewlekane [5]



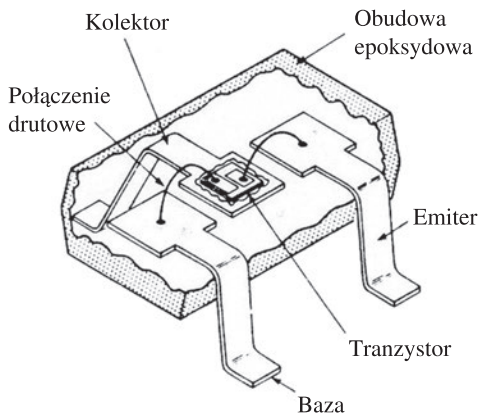
Rys. 5.12. Obudowa PGA, widok od strony wyprowadzeń

bę wyprowadzeń, co oznacza, że takie obudowy mogą być stosowane do układów o małej skali integracji.

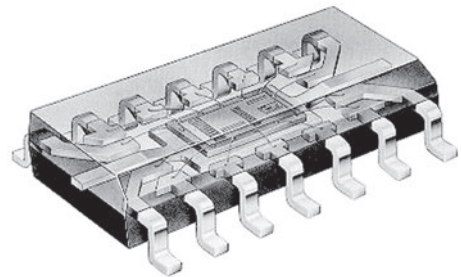
Obudową o znacznie większej liczbie wyprowadzeń jest obudowa z matrycą w postaci kołków (ang. *Pin Grid Array*, PGA), co pokazano na rysunku 5.12. Obudowa matrycowa typu PGA daje możliwość montowania układów scalonych o dużej skali integracji. Wyprowadzenia tej obudowy, odległe od siebie o 2,54 mm, są rozmieszczone pod obudową w kilku rzędach odległych od siebie też o 2,54 mm.

Obudowy do technologii montażu powierzchniowego mają bardzo zróżnicowaną architekturę wyprowadzeń; od obudów dwurzędowych, poprzez obudowy z wyprowadzeniami na wszystkich krawędziach do obudów z kontaktami w siatce rastrowej.

Na rysunku 5.13 pokazano obudowę typu SOT zawierającą pojedynczy tranzystor. Dla struktur o większej skali integracji opracowano dwurzędowe obudowy SO (ang. *Small Outline Integrated Circuits*). W obudowach tych raster rozstawienia wyprowadzeń wynosi 1,27 mm, a typowa liczba wyprowadzeń wynosi od 8 do 32 (przykład pokazano na rys. 5.14). Obudowy SO mają wyprowadzenia tasiemkowe w kształcie rozplaszczonej litery Z (jak na rys. 5.14). Końcówkę taką określa się jako końcówkę typu „skrzydło mewy” (ang.



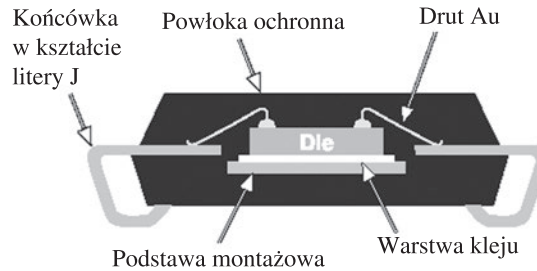
Rys. 5.13. Obudowa SOT pojedynczego tranzystora [4]



Rys. 5.14. Przykład obudowy SO [9]

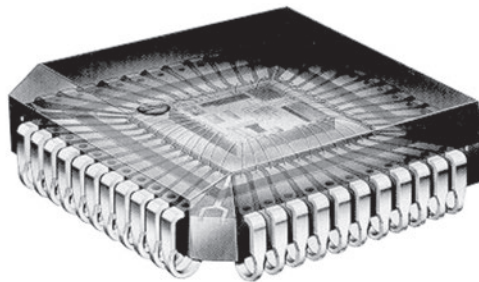
Gull Wing Leads). Symbolem SOJ określa się wyprowadzenia podwinięte, określane jako końcówki w kształcie litery J (ang. *J-leads*). Kształt ten pokazano na rysunku 5.15.

Istnieje również zminiaturyzowana wersja obudowy SO – obudowa VSO o zwiększonej do 56 liczbie wyprowadzeń i rastrze rozstawienia wyprowadzeń w zakresie 0,63–0,76 mm. Dalsze zwiększanie liczby wyprowadzeń nie jest praktykowane ze względu na nadmierne naprężenia ścinające powstające w połączeniach lutowanych generowane przez zmiany temperatury przy długich obudowach. Aby zmniejszyć te naprężenia opracowano typ obudów kwadratowych z wyprowadzeniami rozmieszczonymi na wszystkich bokach oznaczanych jako PLCC.

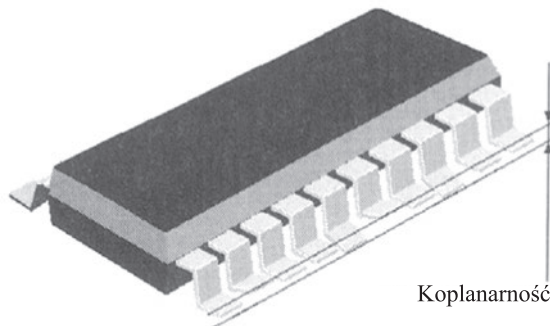


Rys. 5.15. Schemat obudowy SOJ z końcówki w kształcie litery J

Nośnik struktury w obudowie tworzywowej z końcówkami (ang. *Plastic Leaded Chip Carrier*, PLCC) pokazano na rysunku 5.16. Raster rozstawienia tej obudowy jest stały i wynosi 1,27 mm (0,05"), a końcówki w kształcie litery J podwinięte są pod obudowę. Liczba wyprowadzeń nie przekracza 84. Wyprowadzenia takie są mało elastyczne i wymagana jest ich koplanarność (ang. *coplanarity*) na poziomie lepszym niż 0,1 mm w celu zapewnienia prawidłowego lutowania. Koplanarność to maksymalna różnica wysokości wyprowadzeń co pokazano na rysunku 5.17.

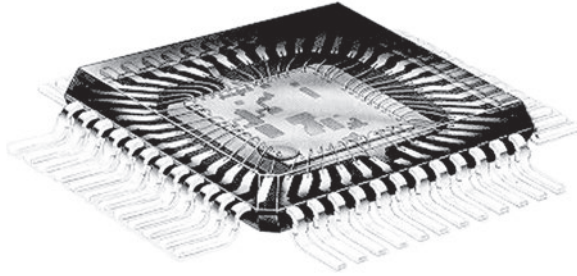


Rys. 5.16. Obudowa PLCC (z końcówki w kształcie litery J) [9]



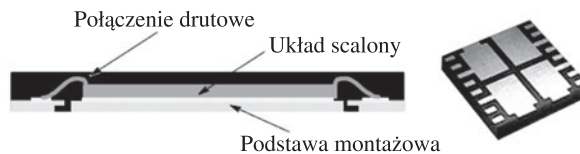
Rys. 5.17. Definicja koplanarności [5]

Kolejnym krokiem było opracowanie obudowy oznaczonej jako QFP (ang. *Quad Flat Pack*). To obudowa płaska czterostronna z końcówkami typu „skrzydło mewy” (rys. 5.18), a właściwie cała rodzina obudów o zróżnicowanej ilości wyprowadzeń (od 32 do ponad 200) i o zróżnicowanym rastrze (od 0,4 mm do 1,0 mm). Istnieje wiele odmian tego typu obudów, oznaczanych dodatkowymi literami, np. LQFP (*Low profile QFP*), TQFP (*Thin QFP*), PQFP (*Plastic*) i inne.



Rys. 5.18. Obudowa QFP (z końcówki typu „skrzydło mewy”) [9]

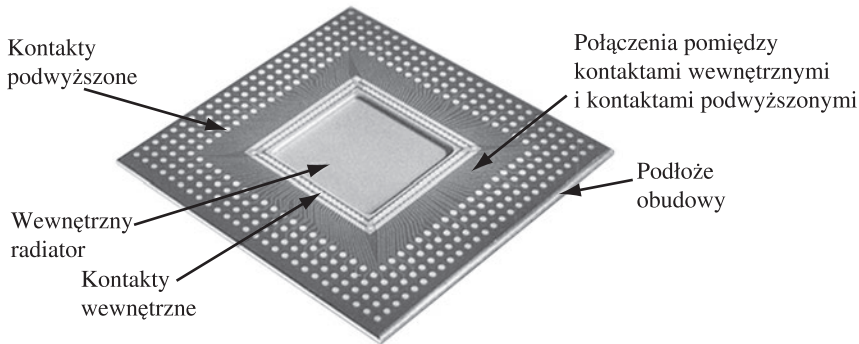
Odmianą wersję obudów z wyprowadzeniami obwodowymi stanowią obudowy QFN (*Quad Flat No-Lead*). Należą one do obudów z wyprowadzeniami płaskimi zintegrowanymi ze spodem obudowy. Wyprowadzenia te rozmieszczone są obwodowo wzdłuż czterech boków. Obudowa QFN wyróżnia się tym, że centralną część spodu obudowy stanowi duże pole lutownicze, do którego przytwierdzona jest struktura półprzewodnikowa, co ułatwia odprowadzanie ciepła (rys. 5.19). Obudowy mają od 8 do 100 wyprowadzeń i podziałkę rozstawienia wyprowadzeń od 0,4 mm do 1,27 mm. Cechą szczególną obudów typu QFN jest ich mała grubość – 0,25 mm, a krótkie połączenia elektryczne pozwalają na podniesienie częstotliwości pracy układów aż do 10 GHz.



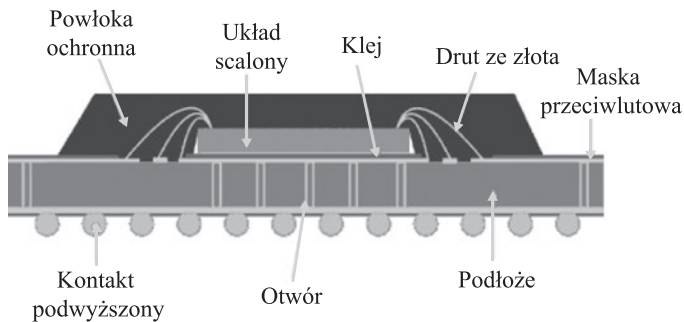
Rys. 5.19. Przekrój przez obudowę QFN i widok (od strony połączeń) obudowy zawierającej cztery struktury

Przedstawione powyżej obudowy przeznaczone są do montażu przewlekane lub powierzchniowego. Nowsza generacja obudów wykorzystująca do połączeń nie tylko krawędź, ale i powierzchnię dolną, jest łączona z płytką obwodu drukowanego w technice flip chip. Są to obudowy BGA, (rys. 5.20), opisane jako obudowy z kontaktami sferycznymi w siatce rastrowej (ang. *Ball Grid Array*). Te matrycowe obudowy mają wyprowadzenia w postaci kontaktów podwyższonych, które rozmieszczane są w matrycy o odstęp-

pach 1,52 mm; 1,27; 1,0; 0,8; 0,75; 0,65, a nawet 0,5 mm. Średnica kontaktów określana jest jako 60% podziałki lub ma wartość stałą (np. 0,3 mm). Liczba wyprowadzeń w takich układach waha się od kilkudziesięciu do ponad 1500. Budowę wewnętrzną, a dokładniej strukturę połączeń pokazano na rysunku 5.21. Jak widać, w tym rozwiązaniu konstrukcyjnym układ aktywny został połączony z obudową w technice montażu drutowego. Połączenia te można wykonać także w technice flip chip (rys. 2.6).



Rys. 5.20. Obudowa BGA; widok od strony połączeń wg [4]

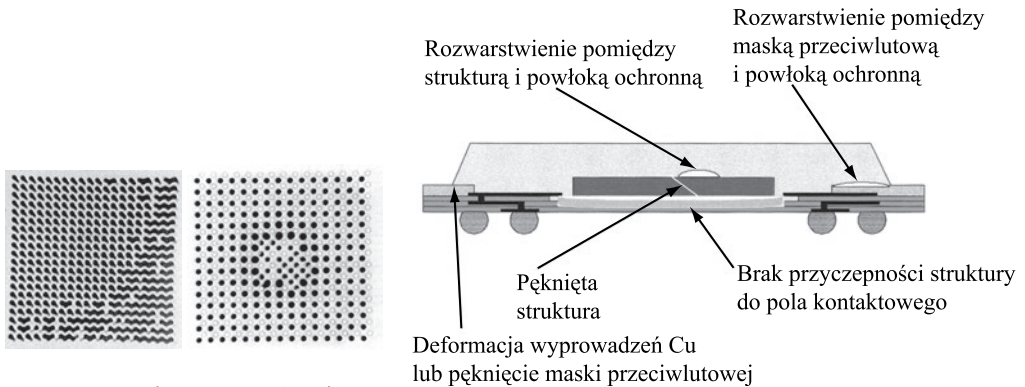


Rys. 5.21. Struktura połączeń w obudowie BGA [2]

W porównaniu do obudów z wyprowadzeniami na krawędziach (np. QFP) obudowy BGA mają wiele zalet, takich jak:

- korzystniejszy stosunek liczby wyprowadzeń do wymiarów obudowy,
- gwarancję koplarności (dopuszczalna koplarność BGA $\leq 150 \mu\text{m}$, może być spowodowana zwichrowaniem obudowy wskutek skurczu tworzywa sztucznego),
- mniejszą liczbą wad lutowania,
- samonastawność wskutek napięcia powierzchniowego (co oznacza mniejsze wymagania co do dokładności układania BGA z wyprowadzeniami sferycznymi topiącymi się w czasie lutowania),
- lepsze właściwości elektryczne.

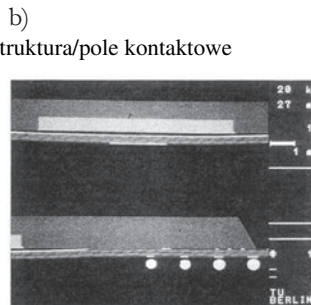
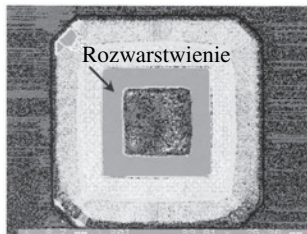
Do wad montażu zaliczyć należy głównie brak łatwej kontroli stanu połączeń i brak możliwości napraw. W przeciwieństwie do możliwości kontroli wizualnej połączeń lutowanych w technologii montażu powierzchniowego, tutaj możliwa jest praktycznie jedynie inspekcja rentgenowska, która ujawnia nieprawidłowości połączeń (rys. 5.22). Oprócz wad montażu mogą pojawiać się wady wewnątrz samej obudowy. Klasyfikację takich wad pokazano na rysunku 5.23. Wady wewnątrz ujawniane są w trakcie inspekcji mikroskopią akustyczną, która jest nieniszczącą techniką badawczą. Wady można wykryć także na obrazach mikroskopowych zglądów, oczywiście po zniszczeniu struktur. Przykład wady wykrytej mikroskopią akustyczną i potwierdzonej obrazem mikroskopowym zglądu pokazano na rysunku 5.24.



Rys. 5.22. Wady montażu ujawnione inspekcją rentgenowską [4]

Rys. 5.23. Wady wewnątrz struktury BGA [4]

a) wada: Rozwarstwienie na granicy struktura/pole kontaktowe

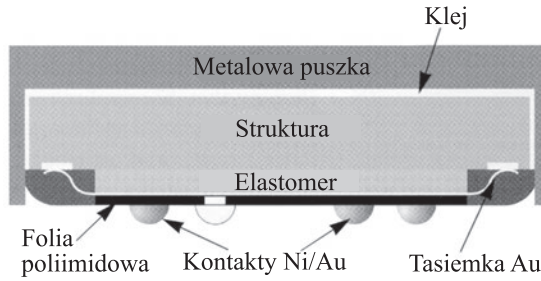


Rys. 5.24. Wada wewnątrz struktury BGA: a) ujawniona mikroskopią akustyczną i b) obrazem mikroskopu skaningowego [4]

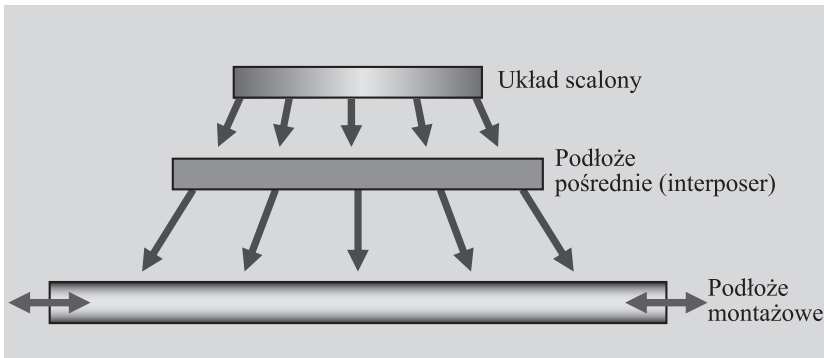
Ze względu na rodzaj nośnika struktury stosowane są obudowy wykonane z tworzyw PBGA (*Plastic Ball Grid Array*), ceramiczne CBGA (*Ceramic Ball Grid Array*) i inne. Z kolei ze względu na rozmiary (szczególnie rozmiary kontaktów) istnieją FBGA (*Fine Ball Grid Array*), UFBGA (*Ultra Fine..*), czy też μ BGA.

Z oceny wielkości poszczególnych elementów składających się na strukturę BGA (rys. 5.21) wynika jednoznacznie, że zestaw kontaktów do montażu flip chip zajmuje znacznie

większą powierzchnię niż układ scalony. Dążąc do miniaturyzacji nie tylko elementów elektronicznych, ale także montowanych zespołów opracowano wersję BGA z małym rastrem, nazywaną obudową w skali struktury CSP (ang. *Chip Scale Package*). Jest to matryca wyprowadzeń w postaci kontaktów sferycznych w rastrze mniejszym niż 1 mm, która spełnia dodatkowo warunek, że rozmiary obudowy nie stanowią więcej niż 1,2 rozmiarów struktury lub powierzchnia obudowy nie jest większa niż 1,5 powierzchni struktury półprzewodnikowej.



Rys. 5.25. Obudowa SCP [4]



Rys. 5.26. Rola interposera w dopasowaniu rozmiarów rastra wyprowadzeń układu scalonego i rastra montażowego wg [3]

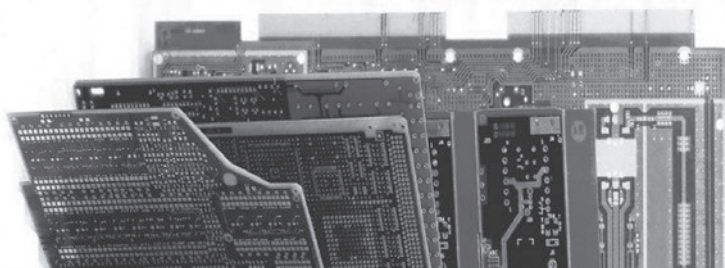
Przykład obudowy CSP pokazano na rys. 5.25. Struktura półprzewodnikowa jest tu mocowana do podłoża (folii poliimidowej dwustronnie laminowanej Cu) z użyciem elastomeru, który ogranicza skutki niedopasowania współczynników rozszerzalności cieplnej. Pola kontaktowe układu scalonego są połączone z kontaktami obudowy elastycznymi tasiemkami (Au lub Ni(Cu) pokryte Au). Obudowa może mieć jeden lub więcej poziomów ścieżek przewodzących do redystrybucji wyprowadzeń.

Przedstawione przykłady obudów układów scalonych spełniają dwie funkcje. Pierwszą jest ochrona delikatnej struktury półprzewodnikowej przed narażeniami środowiskowymi i umożliwienie prowadzenie automatycznego łączenia takich struktur w układy w procesie montażu elektronicznego. Drugą ilustruje rysunek 5.26. Zastosowanie pośred-

niego wielowarstwowego podłoża (ang. *interposer*) jest konieczne do tego, aby gęsto upakowane wyprowadzenia występujące w strukturze półprzewodnikowej „przetworzyć” na gęstość rozmieszczenia wyprowadzeń obudowy układu scalonego, która w dalszej kolejności ma być akceptowalna przez gęstość połączeń montażowej płytki obwodu drukowanego. Obecne możliwości technologiczne sprawiają, że miniaturyzacja struktur półprzewodnikowych wyprzedza możliwości montażu, co powoduje wspomnianą wcześniej „lukę technologiczną” (rys. 1.2).

6. PODŁOŻA PŁYTKI OBWODÓW DRUKOWANYCH

Podstawowym celem drugiego poziomu montażu elektrycznego jest łączenie elementów biernych i układów scalonych w funkcjonalne podzespoły. Montaż wykonuje się na podłożach, zazwyczaj na płytkach obwodów drukowanych (rys. 6.1). Podłoże takie określane jest akronimem PCB (ang. *Printed Circuit Board*) lub PWB (*Printed Wiring Board*) i oznacza organiczny lub nieorganiczny kompozyt z zespołem zewnętrznych i wewnętrznych połączeń elektrycznych przeznaczony do montażu mechanicznego i elektrycznego elementów elektronicznych. Dodatkowo, podłoże powinno skutecznie rozpraszać ciepło generowane przez elementy. W Europie bardziej rozpowszechnione jest użycie oznaczenia PCB, dlatego dalej jest używany ten akronim.



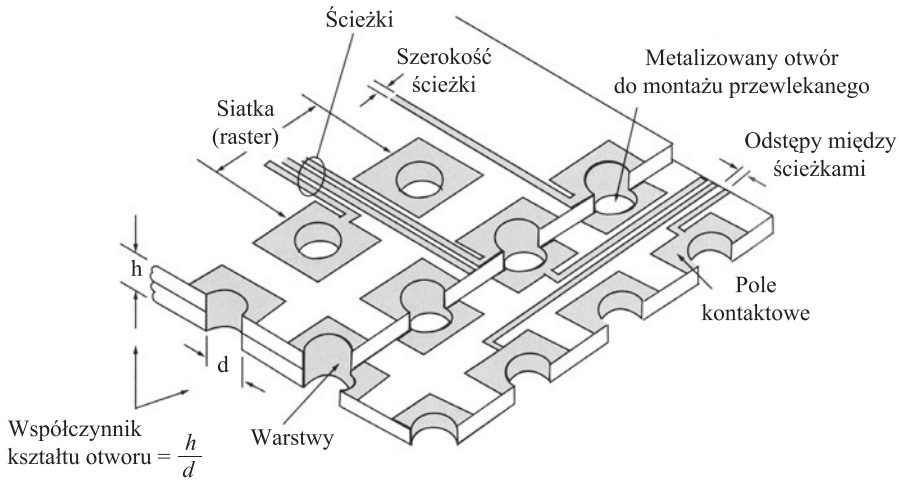
Rys. 6.1. Różne rodzaje płytek obwodów drukowanych [4]

Ze względu na swoje przeznaczenie, podłoża montażowe powinny spełniać następujące wymagania:

- zapewniać zgodność współczynników rozszerzalności cieplnej podłoża i elementów,
- charakteryzować się dużą przewodnością cieplną,
- umożliwiać uzyskanie dużej gęstości połączeń,
- charakteryzować się małą wartością stałej dielektrycznej.

6.1. RODZAJE PODŁOŻY

Bez względu na rodzaj podłoża i przeznaczenie PCB składa się z płytki izolacyjnej o odpowiedniej grubości i sztywności pokrytej przewodzącą mozaiką połączeń i pól lutowniczych. Te zasadnicze elementy płytki obwodu drukowanego pokazano na rysunku 6.2. W płytkach wielowarstwowych przewodząca mozaika musi być trójwymiarowa i łączyć elementy poszczególnych warstw.



Rys. 6.2. Podstawowe elementy płytki obwodu drukowanego; tu PCB do montażu przewlekanego wg [5]

Warstwa przewodząca powinna mieć możliwie małą rezystywność, dobre zwilżanie przez luty oraz możliwości tworzenia mozaiki linii o stałej szerokości (nawet ułamków milimetrów). Najczęściej stosowanym materiałem przewodzącej mozaiki jest miedź.

Materiał izolacyjny powinien:

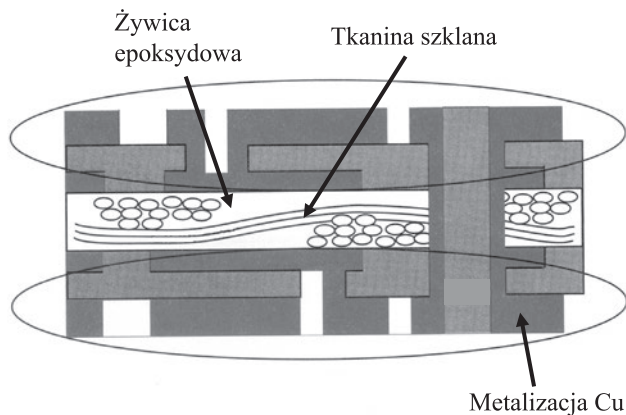
- mieć maksymalnie dużą rezystywność i wytrzymałość napięciową,
- charakteryzować się dużą wytrzymałością mechaniczną,
- być odporny na związki chemiczne stosowane w procesie produkcyjnym, lutowania, mycia itp.,
- nie absorbować wilgoci,
- być odpornym na temperatury procesów technologicznych,
- umożliwiać wiercenie otworów,
- cechować się wartościami współczynników rozszerzalności cieplnej podobnymi do CTE współpracujących materiałów, a także umiarkowaną rozszerzalnością w kierunku z,
- umożliwiać odprowadzanie ciepła.

Podłoża montażowe można klasyfikować według kilku kryteriów. Pierwsze z nich może dotyczyć materiału, z jakiego wykonana jest płytką izolacyjną, co pozwala na rozróżnienie PCB organicznych i nieorganicznych. Podstawowymi materiałami podłoży organicznych są laminaty, będące kompozytami warstwowymi, które otrzymuje się przez prasowanie (laminowanie) wypełniaczy włóknistych, nasyconych żywicami, które stanowią materiał wiążący. Najczęściej stosuje się żywice fenolowe i epoksydowe. Oprócz nich, do celów specjalnych, stosuje się też teflon, poliiimid, BT (*Bismaleimide Triazine*), BCB (*BenzoCycloButene*) i poliestr. Skład i oznaczenia wybranych laminatów podano w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Skład i oznaczenia wybranych płytek izolacyjnych podłoży

Żywica	Wypełniacz	Oznaczenie
		papier (arkusze)
	bawełna (tkanina)	C, CE, L, LE
Fenolowa	szkło (file)	G-2
	szkło (tkanina)	G-3
	nylon (włókna)	N-1
	papier (arkusze)	FR-3
Epoksydowa	papier + szkło	CEM-1
	szkło (tkanina)	G-10, G-11, FR-4, FR-5
Poliimid	szkło (tkanina)	GI-250
Poliester	szkło (file)	GPO-1, GPO-2
Epoksydowa + BT	szkło (tkanina)	GI-180

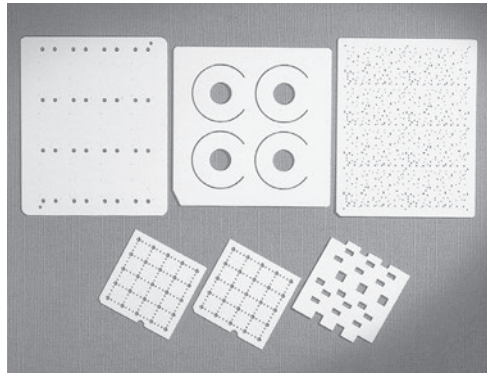
Na uwagę zasługuje laminat oznaczony symbolem FR-4, szeroko rozpowszechnione podłoże w urządzeniach komercyjnych. PCB z takim podłożem i miedzianą mozaiką przewodzącą (rys. 6.3) charakteryzuje się niską ceną i efektem zahamowania (samogaszeniem) palenia (ang. *flame retardancy*, FR). Temperatura zeszklenia T_g (ang. *glass transition temperature*) tego laminatu wynosi 120–135 °C, co jest wartością akceptowalną dla większości zastosowań FR-4. Współczynnik rozszerzalności cieplnej ma wartość podobną jak wartość CTE dla miedzi – 16 ppm/ K.



Rys. 6.3. Przekrój przez płytkę FR-4 wg [5]

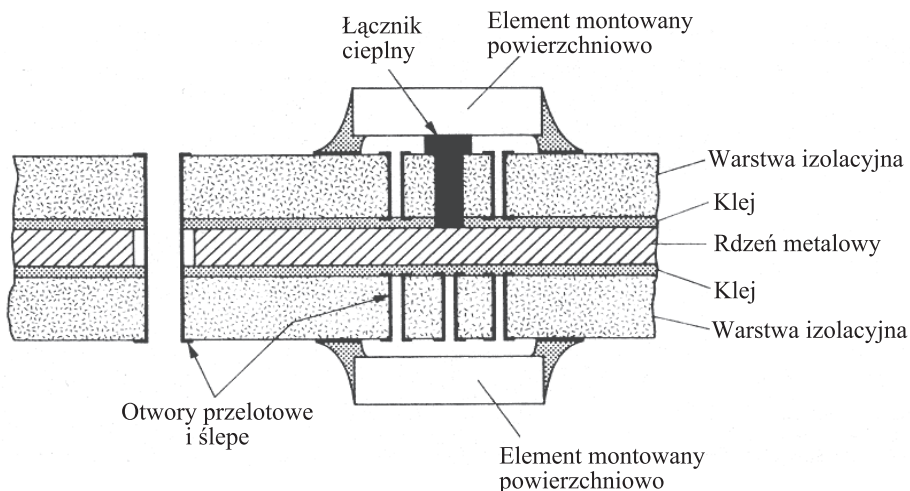
Oprócz podłoży organicznych stosowane są podłoża ceramiczne (rys. 6.4) i inne, w tym także metalowe. Podłoża ceramiczne są stosowane w mikroelektronice hybrydowej. Głównym tego powodem są zbliżone współczynniki rozszerzalności cieplnej podłoża i elementów. Mozaika połączeń stanowi na powierzchni kombinację warstw przewodzących, rezystywnych i izolacyjnych wykonanych metodą sitodruku, a następnie wy-

palonych w temperaturze ok. 900 °C. Pasta, która tworzy mozaikę jest kompozytem na osnowie żywicy, zawierającym wypełniacz w postaci mieszaniny materiału przewodzącego i szkła. Podczas wypalania żywica zostaje usunięta, a szkło łączy się z ceramiką. W powszechnym użyciu są materiały ceramiczne zawierające od 96 do 99,5% Al_2O_3 o współczynniku rozszerzalności cieplnej 6,4–6,6 ppm/K, ceramika berylowa (BeO) o dużej wartości współczynnika przewodnictwa cieplnego (250 (W/m·K)), która jest toksyczna, a także nietoksyczna ceramika AlN i inne.

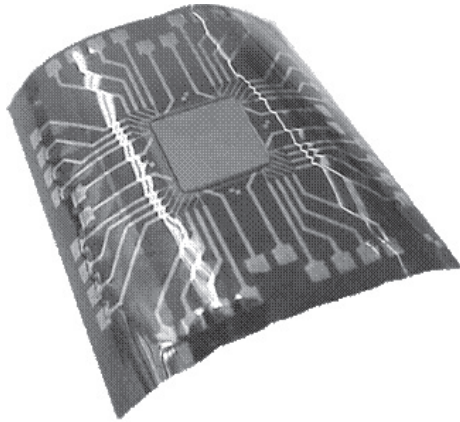


Rys. 6.4. Podłoża ceramiczne [4]

Podłoża metalowe wykonywane są wielowarstwowo: metal podłoża, następnie szkło lub polimer jako warstwa izolacyjna i cienka warstwa metalu jako mozaika przewodząca. Budowa jest zazwyczaj symetryczna (rys. 6.5), co zapobiega deformacjom przy zmianach temperatury. Takie podłoża stosowane są w specjalnych warunkach bądź wysokiej temperatury pracy, bądź konieczności wydajnego odprowadzania ciepła.



Rys. 6.5. Podłożo z rdzeniem metalowym wg [4]



Rys. 6.6. Przykład poliimidowej płytki giętkiej [3]

Z rodzajem i grubością płytki izolacyjnej związane jest kryterium sztywności. W większości zastosowań używane są płytki sztywne. Są także płytki sztywno-giętkie i giętkie (rys. 6.6). Materiałem podłożowym płytek giętkich są zwykle folie poliestrowe lub poliamidowe o grubości 12,5–125 μm , pokryte kilkunastu bądź kilkudziesięciu mikrometrową folią miedzianą. Do specjalnych zastosowań używa się płytek profilowanych przestrzennie. Takie płytki wykonuje się z tworzyw termoplastycznych.

W zależności od ilości powierzchni montażowych, do których można łączyć elementy, rozróżnia się płytki jednostronne lub dwustronne. Płytki wielowarstwowe mogą zawierać wewnętrzne warstwy z zagrzebanymi elementami biernymi, warstwy przewodzące i inne. W zależności od przewidywanej techniki montażu płytki mogą zawierać mozaikę z płaskimi polami kontaktowymi do montażu powierzchniowego, otwory w polach kontaktowych (rys. 6.2) do montażu przewlekanego, bądź też mogą być przeznaczone do obu technik montażowych.

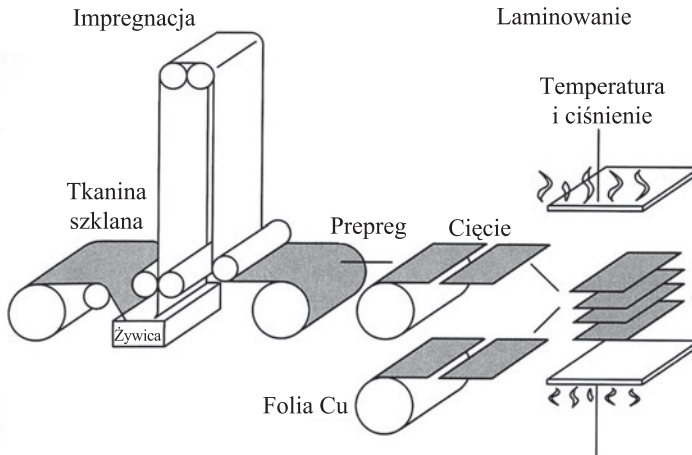
6.2. WYTWARZANIE PŁYTEK OBWODÓW DRUKOWANYCH

Wytwarzanie płytek obwodów drukowanych (rys. 6.7) przebiega w następujących etapach:

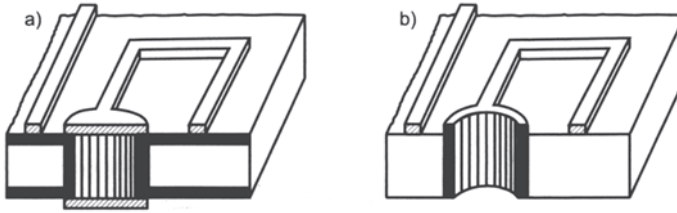
- tkanina szklana jest impregnowana żywicą epoksydową w stanie wstępnego utwardzenia (rozpuszczoną w rozpuszczalnikach),
- nasączona żywicą tkanina szklana jest suszona i cięta na arkusze, są to tzw. prepregi,
- na prepregi laminowana jest folia miedziana (jednostronnie lub dwustronnie).

Wytwarzanie płytek wielowarstwowych wymaga licznych operacji technologicznych, co jest związane z koniecznością wykonania połączeń między poszczególnymi warstwami.

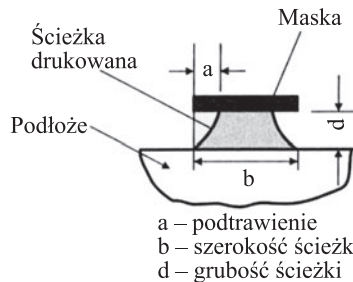
Mozaikę ścieżek przewodzących i pól kontaktowych wykonuje się metodą subtraktywną lub addytywną. W metodzie subtraktywnej materiałem wyjściowym jest laminat foliowany miedzią, na którą nanosi się emulsję fotolitograficzną. Metodą optyczną tworzy się



Rys. 6.7. Proces produkcyjny PCB wg [5]

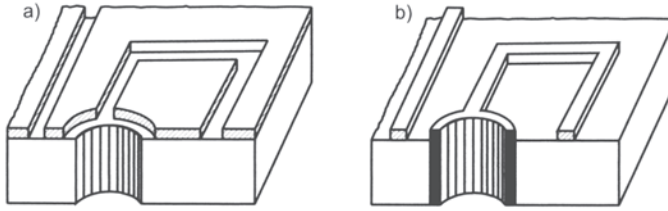


Rys. 6.8. Formowanie mozaiki przewodzącej metodą subtraktywną;
 a) laminat z warstwą mozaiki uformowaną w emulsji,
 b) laminat z warstwą ścieżek mozaiki [16]



Rys. 6.9. Podtrawianie ścieżek przewodzących w technologii subtraktywnej wg [16]

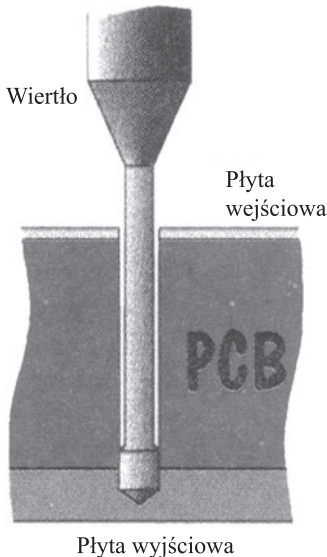
w emulsji wzór mozaiki, a pozostała, niespolimeryzowana warstwa emulsji zostaje wypłukana (rys. 6.8a). Kolejnym etapem technologicznym jest trawienie odkrytych obszarów miedzi, a po usunięciu wcześniej utwardzonej emulsji powstaje PCB z warstwą ścieżek (rys. 6.8b). Ten sposób formowania ma ograniczenia wymiarowe związane z podtrawianiem (rys. 6.9), co uniemożliwia wykonanie ścieżek o szerokości mniejszej niż 0,2 mm.



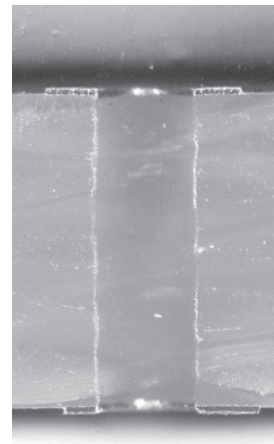
Rys. 6.10. Formowanie mozaiki przewodzącej metodą addytywną;
 a) laminat z wzorem mozaiki uformowanej w emulsji,
 b) laminat z warstwą ścieżek mozaiki [16]

W metodzie addytywnej wykorzystuje się podłoża bez warstwy metalu. Na powierzchnię płytki izolacyjnej nanosi się emulsję fotolitograficzną i po naświetleniu odkrywa się te płaszczyzny, które będą stanowiły mozaikę ścieżek i pól lutowniczych (rys. 6.10a). W odkrytych miejscach nanosi się materiał elektrycznie przewodzący, charakteryzujący się dobrą adhezją do podłoża (lub wcześniej nanosi się warstwę adhezyjną). Przewodząca warstwa jest pogrubiana galwanicznie do wymaganej grubości, a zbędna warstwa emulsji jest usuwana (rys. 6.10b). Tą metodą można uzyskiwać ścieżki o szerokościach poniżej 50 μm , a brak efektu podtrawiania powoduje, że ścieżki mają regularne kształty o krawędziach prostopadłych do podłoża.

W zdecydowanej większości konstrukcji PCB wymagają wykonania otworów. W najprostszym wariantcie są to otwory do montażu przewlekanego w płytkach jedno- lub dwustronnych. Są różne techniki wykonywania otworów, szczególnie dla połączeń międzypiętrowych.



Rys. 6.11. Wiercenie otworów w PCB [4]



Rys. 6.12. Otwór $\text{Ø } 0,3$ wiercony w laminacie FR-4 o grubości 1 mm [17]

dzywarstwowych (rozdz. 6.3), ale w produkcji wielkoseryjnej przy wykonywaniu otworów do montażu stosuje się głównie wiercenie mechaniczne (rys. 6.11). Wiertła z węglików spiekanych w obrabiarkach wielowrzecionowych (np. 100 wiertel) wykonują otwory z dużą wydajnością, co wymaga obrotów rzędu 50–100 tysięcy na minutę przy przesuwie wiertel 50–400 cm/min. Parametry procesu muszą być bardzo precyzyjnie dobrane, aby uniknąć rozwarstwień płytek, stopienia lub spalenia kompozytu polimerowego lub też spalenia wiertel. Na rysunku 6.12 pokazano prawidłowo wykonany otwór $\varnothing 0,3$ mm w laminacie FR-4 o grubości 1 mm. Otwory połączeniowe powinny być metalizowane lub w inny sposób musi być zapewniony kontakt elektryczny (rozdz. 6.3).

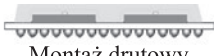
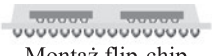



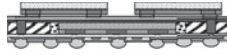

6.3. PŁYTKI WIELOWARSTWOWE

Postępująca miniaturyzacja elementów elektronicznych stanowi przesłankę do stosowania wielowarstwowych płytek obwodów drukowanych o dużej gęstości połączeń (ang. *High Density Interconnect*, HDI). Zagęszczenie sieci połączeń w płytkach obwodów drukowanych można osiągnąć przez:

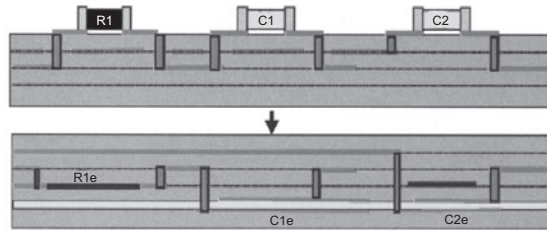
- miniaturyzację poszczególnych elementów mozaiki obwodu płytki drukowanej (ścieżki przewodzące, pola lutownicze itd.);
- zwiększanie liczby warstw sygnałowych w pakiecie płytki obwodu drukowanego.

Dalsza miniaturyzacja elementów mozaiki obwodu drukowanego jest ograniczona możliwościami rozdzielczości optycznej procesów fotochemigrafii, w wyniku których powstaje obraz mozaiki obwodu drukowanego. Ponadto bardzo wąskie ścieżki sygnałowe oraz małe odległości między nimi wpływają na wzrost istotności elementów pasożytniczych parametrów elektrycznych obwodu drukowanego, takich jak: rezystancja połączenia, jego pojemność oraz indukcyjność. W konsekwencji powoduje to obniżenie granicznych częstotliwości propagacji sygnałów w obwodzie elektrycznym. Pozostaje drugi kierunek realizacji wymogu HDI – przejście z montażu na powierzchni płytki do montażu wielowarstwowego z wykorzystaniem płytek wielowarstwowych, zawierających elementy wbudowane (rys. 6.13).

Korzyści wynikające ze stosowania elementów wbudowanych to w głównej mierze zwolnienie powierzchni montażowych (rys. 6.14), co pozwala na bardziej gęste upakowanie elementów czynnych na tych powierzchniach. Wymaga to jednak stosowania specjalnych technologii wykonywania elementów. Do wytworzenia rezystorów stosuje się technikę cienkowarstwową, grubowarstwową lub powlekanie galwaniczne. W technice cienkowarstwowej uzyskuje się lepszą tolerancję (5%) bez doregulowania laserowego niż przy stosowaniu sitodruku grubowarstwowego (20%). Materiałem, z którego wykonuje się rezystory grubowarstwowe jest zwykle kompozyt polimerowy na bazie żywic epoksydowych, natomiast na rezystory cienkowarstwowe – CrSi lub azotek tytanu. Do wytwarzania wbudowanych kondensatorów stosuje się techniki sol–gel, nanoszenie poprzez napylenie, anodyzację i inne.

Rozmieszczenie płaskie		 Montaż drutowy	 Montaż flip-chip
Rozmieszczenie przestrzenne	z interposerem	 Montaż drutowy	 Montaż drutowy + flip-chip
	bez interposera	 Montaż struktur „jedna na drugiej”	
Struktury wbudowane		 Układy scalone wbudowane + montowane na powierzchni	 Układy wbudowane (struktura 3D)

Rys. 6.13. Kierunek miniaturyzacji – tworzenie struktur przestrzennych z elementami wbudowanymi wg [3]



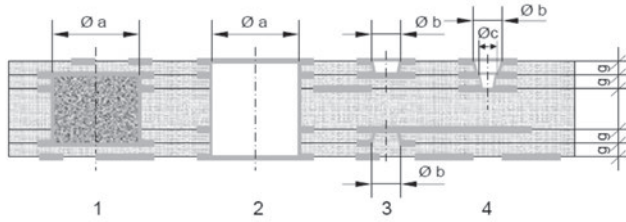
Rys. 6.14. Zwolnienie powierzchni montażowej podczas wprowadzenia elementów wbudowanych [4]



Rys. 6.15. Różnego typu połączenia międzywarstwowe [3]

Tworzenie zintegrowanych, wielowarstwowych systemów wymaga zapewnienia kontaktu pomiędzy elementami różnych warstw (rys. 6.15). Połączenia w płytkach obwodów drukowanych można podzielić na dwie podstawowe grupy: połączenia warstwowe wykonywane w postaci ścieżek przewodzących oraz połączenia międzywarstwowe w postaci metalizowanych otworów. Mikrootworami (ang. *microvias*) nazywa się formowane lub metalizowane otwory, których średnica jest mniejsza bądź równa 150 μm. W płytkach obwodów drukowanych może występować kilka rodzajów połączeń międzywarstwowych, których budowę schematycznie przedstawiono na rys. 6.16.

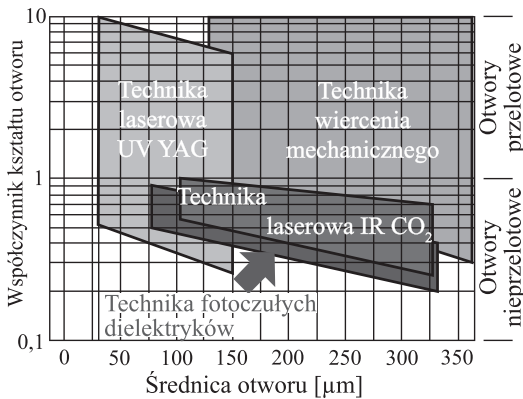
Konstrukcja poszczególnych połączeń międzywarstwowych uzależniona jest od ich przeznaczenia oraz od techniki wytwarzania. Pierwsze dwa rodzaje połączeń (1 i 2) oparte są na



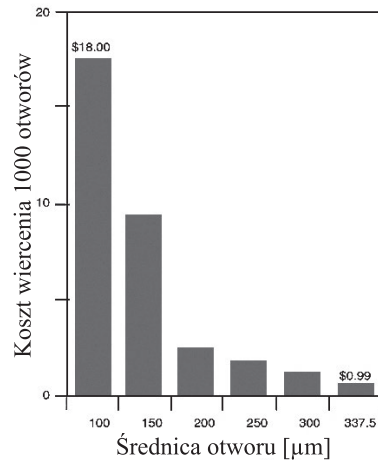
Rys. 6.16. Połączenia międzywarstwowe w wielowarstwowej płytce obwodu drukowanego oparte na otworze: 1 – wewnętrznym zabudowanym; 2 – przelotowym; 3 – nieprzelotowym; 4 – nieprzelotowym wielostopniowym; typowo: $a = 0,3 \div 0,5$ mm; $b = 0,15$ mm; $c = 0,1$ mm; $g = 0,07 \div 0,11$ mm [17]

otworach przelotowych z reguły wierzonych mechanicznie. Dwa kolejne rodzaje połączeń międzywarstwowych (3 i 4) wykonywane są na podstawie otworów nieprzelotowych (*Blind Via*), które mogą być formowane zarówno metodą wiercenia mechanicznego, jak również z użyciem innych technik. Przedstawione rodzaje połączeń międzywarstwowych różnią się między sobą nie tylko wymiarami i technologią formowania otworów, ale także sposobem wykonywania metalizacji otworów.

Jak wspomniano, otwory w płytkach obwodów drukowanych mogą być formowane kilkoma metodami. Najczęściej stosuje się wiercenie mechaniczne, drążenie wiązką laserową, a także technikę fotoczułych dielektryków oraz trawienie plazmowe. Wszystkie wymienione metody pozwalają formować otwory w ograniczonym zakresie średnic i głębokości, co przedstawiono na rys. 6.17.



Rys. 6.17. Wielkość formowanych otworów w zależności od metody wykonywania [17]



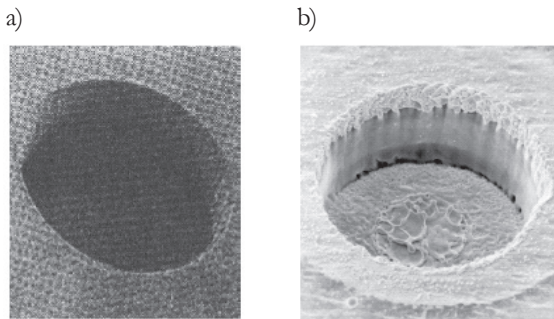
Rys. 6.18. Koszt wiercenia mechanicznego w zależności od średnicy otworu [4]

Technika wiercenia mechanicznego jest najbardziej rozpowszechnioną techniką formowania otworów w płytkach obwodów drukowanych. Jednak wraz ze zmniejszaniem

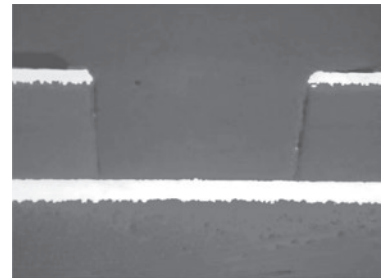
się średnicy wierconych otworów koszt operacji gwałtownie wzrasta (rys. 6.18). Z tego powodu przy drążeniu otworów w płytkach HDI dominują techniki ablacji laserowej. Proces drążenia laserowego warstwy dielektrycznej opiera się na wykorzystaniu dwóch zjawisk: ablacji fototermicznej oraz ablacji fotochemicznej.

Ablacja fototermiczna polega na procesach podgrzewania i odparowania obrabianego materiału. Do tego celu używa się laserów emitujących widmo w zakresie widzialnym lub podczerwonym (ang. *Infra Red*, IR), którego długość fali zawiera się w przedziale 500÷10 600 nm. Zaabsorbowana przez materiał energia wiązki laserowej podgrzewa materiał, powodując jego topienie i odparowanie. Taki proces termiczny powoduje naruszenie struktury wokół drążonego otworu. Jeżeli materiałem, w którym wykonuje się otwory, jest laminat epoksydowo-szkłany, to ścianki otworu są zawsze zwęglone. Wtedy wymagane jest zastosowanie procesu silnego oczyszczania otworu ze stopionej żywicy (ang. *desmearing*).

Ablacja fotochemiczna występuje jedynie wtedy, gdy energia fotonu przekracza wartość 2 eV, a laser emituje falę o długości poniżej 400 nm, czyli z zakresu ultrafioletu (ang. *Ultra Violet*, UV). Tak duża energia fotonów ma zdolność rozrywania w długołańcuchowych materiałach organicznych wiązań na poziomie molekularnym. W rezultacie cząsteczki zajmują większą przestrzeń niż ich oryginalne molekuly i są wyrzucane z drążonego otworu. Proces ablacji fotochemicznej jest również nazywany procesem „zimnym”, a to z powodu braku obserwowanych uszkodzeń termicznych wokół otworu. Dla zobrazowania różnic między efektami ablacji fototermicznej i fotochemicznej na rys. 6.19 przedstawiono mikrootwory wykonane tymi technikami, a na rys. 6.20 pokazano przekrój przez otwór nieprzelotowy wykonany w materiale RCC (ang. *Resin Coated Copper*) metodą UV.



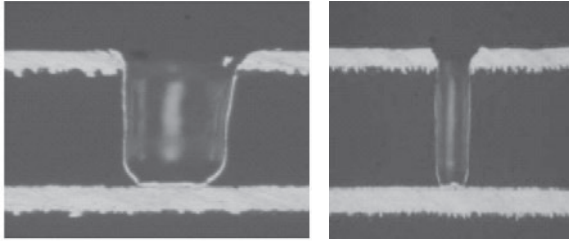
Rys. 6.19. Mikrootwory wykonane z użyciem lasera: a) IR, b) UV [17]



Rys. 6.20. Otwór nieprzelotowy o średnicy 150 μm wykonany laserem UV w materiale RCC [17]

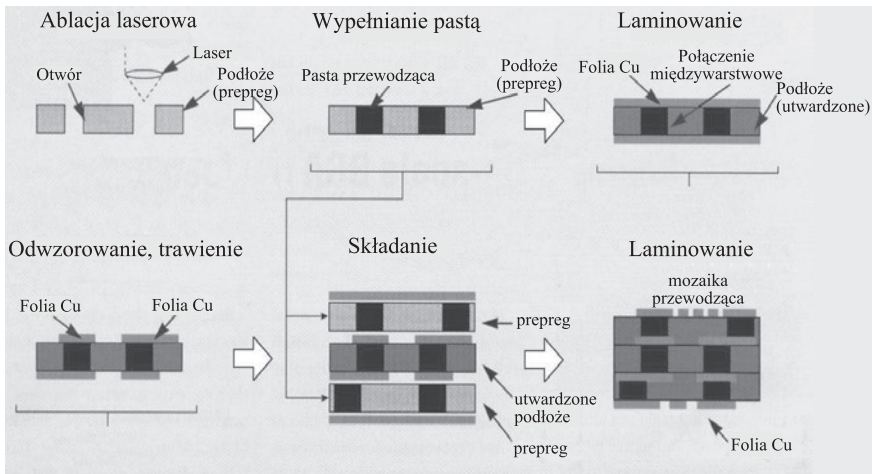
Międzywarstwowe połączenia elektryczne wymagają metalizacji ścianek otworów. Najbardziej rozpowszechnioną techniką jest miedziowanie galwaniczne, poprzedzone procesem osadzania cienkiej warstwy (podwarstwy) przewodzącej. Technika ta pozwala na metalizowanie otworów nieprzelotowych o współczynniku kształtu (stosunku głębokości do średnicy otworu) sięgającym wartości 0,8. Mikrootwory głębsze (o większej war-

tości współczynnika kształtu) wymagają innych technik, np. rozpylania magnetronowego. Przykład pokazano na rys. 6.21. Tak otrzymana warstwa przewodząca jest zbyt cienka i dla zmniejszenia rezystancji wymaga pogrubienia metodami elektrochemicznymi.



Rys. 6.21. Fotografie otworów nieprzelotowych metalizowanych metodą rozpylania magnetronowego miedzi $\varnothing 75 \mu\text{m}$, współczynnik kształtu 1,2 i $\varnothing 25 \mu\text{m}$, współczynnik kształtu 3,6 [17]

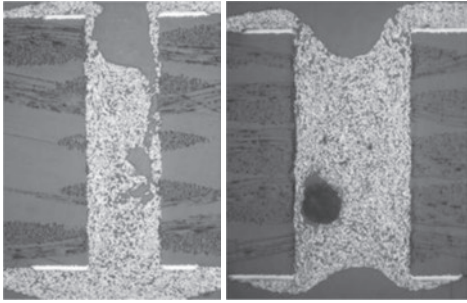
W wypadku połączeń wewnętrznych zabudowanych (połączenia typu 1, 3 i 4 na rys. 6.16) szczególne zastosowanie znajduje technologia określana mianem ALIVH (ang. *Any-Layer Internal Via Hole*). W technologii tej połączenia międzywarstwowe są uzyskiwane poprzez wypełnienie przestrzeni otworów elektrycznie przewodzącymi kompozytami polimerowymi. Proces technologiczny pokazano na rys. 6.22.



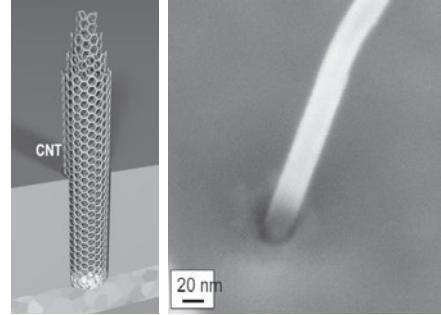
Rys. 6.22. Technologia ALIVH wykonywania otworów wewnętrznych wg [4]

Polimerowe kompozyty elektrycznie przewodzące składają się z wypełniacza (dzięki któremu jest możliwy przepływ prądu) i matrycy, pełniącej rolę spoiwa. Jako wypełniacz są stosowane zazwyczaj płatki srebra o rozmiarach mikrometrowych, a matrycą jest elektrycznie izolujący termoplastyczny lub termoutwardzalny polimer, zwykle żywi-

ca. W wypadku otworów o małych średnicach i dużym współczynniku kształtu pojawiają się problemy technologiczne z prawidłowym wypełnieniem otworu kompozytem. Mogą, na przykład, pojawiać się pustki wewnątrz otworu i pęknięcia na krawędziach (rys. 6.23), które powodują wzrost rezystancji połączenia międzywarstwowego.



Rys. 6.23. Fotografie wypełnień otworów przelotowych o średnicach 0,3 i 0,5 mm wykonanych w laminacie FR-4 o grubości 1,0 mm [17]



Rys. 6.24. Schematy połączenia międzywarstwowego z wykorzystaniem CNT oraz zdjęcie nanorurki węglowej wypełniającej otwór o średnicy 35 nm [3]

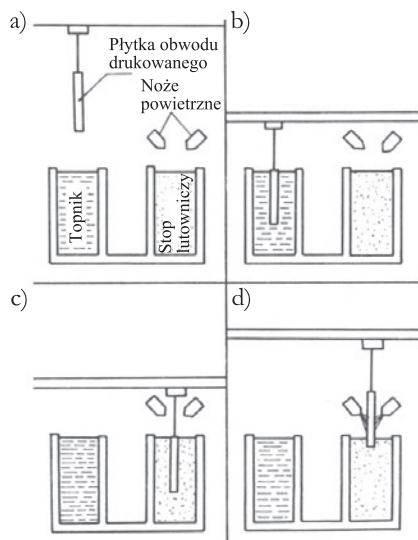
Postępująca miniaturyzacja wymaga poszukiwania nowych technologii wypełniania materiałem przewodzącym otworów o coraz to mniejszych średnicach. Przykładem (rys. 6.24) może być wprowadzanie do otworu o średnicy kilkudziesięciu nanometrów nanorurki węglowej (ang. *Carbon NanoTube*, CNT) o bardzo dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej. Teoretycznie CNT mogą przewodzić prąd o 1000-krotnie większym natężeniu niż przewody metalowe o analogicznej masie, a ich przewodność cieplna może dochodzić do 6000 W/(m·K).

6.4. POWŁOKI KONTAKTOWE

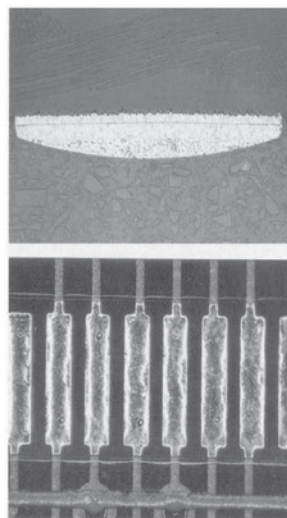
Uzyskanie prawidłowego, niezawodnego połączenia lutowanego jest uwarunkowane między innymi odpowiednim poziomem lutowności pól lutowniczych PCB. W tym celu na powierzchnię mozaiki nanosi się powłoki ochronne, których zadaniem jest zapobieganie procesowi utleniania miedzi w czasie między wykonaniem płytki obwodu drukowanego a montażem na niej zespołu. Powłoki ochronne wpływają w znacznym stopniu na jakość połączenia lutowanego, gdyż tworzone z ich udziałem związki międzymetaliczne na granicy faz powłoka/lut decydują o właściwościach elektrycznych i mechanicznych połączenia lutowanego.

We wcześniej stosowanej technologii lutowania stopem cyna–ołów powszechnym zabezpieczeniem lutowności płytek drukowanych było pokrywanie miedzianej mozaiki przewodzącej warstwą stopu SnPb o składzie zbliżonym do eutektycznego. Zwykle powłoki za-

bezpieczające SnPb наносило методом HASL (ang. *Hot Air Solder Levelling*), т.е. методом погружения PCB в топник и расплавленном припое и выравнивания поверхности припоя горячим воздухом (рис. 6.25). Такой способ нанесения покрытия приводит, что часто покрытие имеет форму чашки (рис. 6.26), а толщина покрытия может изменяться от 1 мкм до 10 мкм.



Rys. 6.25. Technologia HASL nakładania powłok ochronnych; a) przed procesem, b) pokrycie topnikiem, c) pokrycie stopem lutowniczym, d) usunięcie nadmiaru stopu lutowniczego; wg [4]



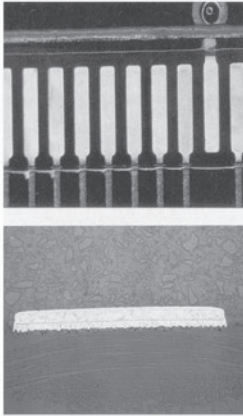
Rys. 6.26. Wygląd i profil powłoki ochronnej SnPb nakładanej metodą HASL [4]

Ze względu na wymagania technologii bezołowiowej wykluczono stop SnPb jako materiał odpowiedni na warstwy ochronne. W bezołowiowej technologii HASL na płytki drukowane najczęściej nanosi się stop $\text{Sn}_{0,7}\text{Cu}^1$, o temperaturze topnienia 227 °C. Wadą tej technologii jest wysoka temperatura topnienia sprawiająca, że płytki drukowane są w procesie nakładania poddawane stresowi termicznemu, który może prowadzić do ich odkształceń, a nawet rozwarstwienia. Powłoka uzyskana w tym procesie jest matowa i ziarnista. Zastosowanie stopu SnAgCu (o zawartości srebra w granicach 3÷4% i miedzi 0,5÷0,7%) powoduje obniżenie temperatury topnienia o około 10 °C. Mimo to powłoka jest również matowa o ziarnistej strukturze.

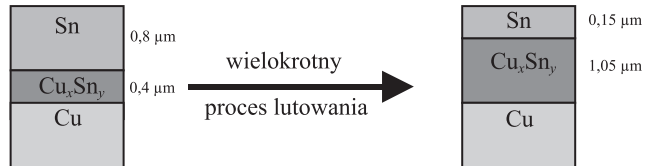
Najbardziej zalecanym stopem do wykonywania powłok metodą HASL jest stop cyny z miedzią (0,7%), z dodatkiem niklu lub kobaltu o zawartości poniżej 1%. Pierwiastki te dodaje się do stopu bezołowiowego w celu stabilizacji stopu w procesie nakładania powłok.

¹ Taki zapis oznacza, że stop zawiera 0,7% miedzi, a resztę stanowi cyna.

W mozaikach płytek HDI stosuje głównie powłoki ze złota. Złoto na płytki drukowane może być nakładane albo metodą elektrochemiczną, albo metodą chemiczną, immersyjną. Powłoki nakładane różnymi metodami różnią się między innymi grubością. Grubość warstwy złota elektrochemicznego zawiera się zazwyczaj w granicach $0,6 \div 0,7 \mu\text{m}$. Grubość warstwy złota chemicznego jest znacznie mniejsza i wynosi najczęściej $0,10 \div 0,15 \mu\text{m}$. W procesie chemicznym warstwę miękkiego złota osadza się na podwarstwie autokatalitycznego niklu o grubości $3 \div 5 \mu\text{m}$, zabezpieczającego złoto przed dyfuzją miedzi z podłoża. Warstwa ma równomierną grubość (rys. 6.27).



Rys. 6.27. Wygląd i profil powłoki ochronnej NiAu [4]



Rys. 6.28. Schemat powstawania warstw międzymetalicznych Cu_xSn_y w procesach lutowania [18]

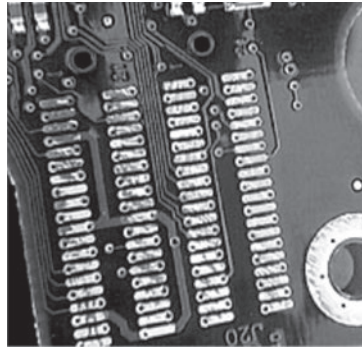
Unikalną właściwością pokrycia NiAu jest jego stabilność w podwyższonej temperaturze, zarówno podczas montażu, jak i w czasie eksploatacji. Jeżeli jednak atomy złota nie tworzą ściślej siatki na powierzchni i nikiel przedostanie się do warstwy zewnętrznej przez porowate złoto, to następuje jego utlenienie na powietrzu i warstwa staje się nielutowalna. Aby uniknąć wad, stosuje się warstwę potrójną NiPdAu. Nałożona chemicznie warstwa palladu stanowi barierę przed migracją niklu i ewentualną jego korozją, która mogłaby następować podczas nakładania warstwy złota.

Jedną z bardziej popularnych technologii tworzenia powłok zabezpieczających jest nakładanie cyny immersyjnej. Pokrycia cynowe można wytwarzać w konwencjonalnym procesie produkcji płytek, tzn. cynować chemicznie, galwanicznie oraz nakładać cynę w stanie ciekłym. Problemem jest jednak powstawanie związków międzymetalicznych (np. Cu_3Sn i Cu_6Sn_5), pokrywanie warstwy tlenkami SnO i SnO_2 , oraz tworzenie dendrytów w postaci kryształów włóknistych, tzw. wiskerów (rozdz. 9.5). Wskutek powstawania związków międzymetalicznych, szczególnie w powtarzanych procesach lutowania, następuje ubytek czystej cyny (rys. 6.28), co powoduje degradację jej lutowalności.

Według nowo opracowanych technologii wprowadza się barierę ochronną między miedź a cynę. W procesie Ormecon na przykład, w pierwszym etapie bezpośrednio na po-

wierzchnię miedzi nanoszony jest organiczny polimer przewodzący o grubości ok. 80 nm. Warstwa polimeru chroni miedź przed utlenianiem oraz stanowi barierę przed tworzeniem się związków międzymetalicznych z warstwą cyny, która nakładana jest w drugiej części procesu produkcyjnego. Warstwa organiczna polimeru zapobiega rozpuszczaniu się miedzi w kąpeli do cynowania, a więc skład tej kąpeli nie ulega zmianie, co przyczynia się do zwiększenia wydajności metody. Generalnie, powierzchnia miedzi zabezpieczona powłoką cyny chemicznej wykazuje dobrą zdolność do lutowania, jest płaska oraz kompatybilna z wieloma lutami oraz topnikami o niskiej aktywności.

Srebro immersyjne jest наносzone bezpośrednio na powierzchnię miedzi w chemicznej reakcji osadzania. Proces trwa krótko (1–2 min) i nie wymaga tak wysokiej temperatury jak proces nakładania powłok złotych, co sprawia, że można go łatwo zautomatyzować. Grubość warstwy powłoki srebrnej wynosi 0,8–1,4 μm . Powierzchnia srebra immersyjnego jest aktywna, wrażliwa na warunki środowiskowe, szczególnie na obecność siarki. Siarczki srebra matowią jej powierzchnię i mogą ograniczać lutowność powłok (rys. 6.29).



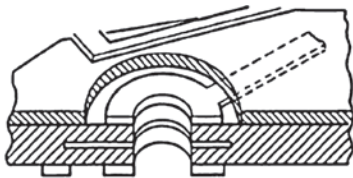
Rys. 6.29. Przyciemniona powierzchnia powłoki Ag [18]

Wymienione powłoki metalowe można podzielić na powłoki niskotopliwe, rozpuszczalne i nierozpuszczalne w lucie. Do powłok niskotopliwych zalicza się te powłoki, które topią się w temperaturze lutowania, a następnie stapiają się z lutem, tworząc metalurgiczne połączenie między lutem a materiałem podłoża. Najlepszym przykładem tego typu są powłoki nakładane metodą HASL (SnPb, SnCu).

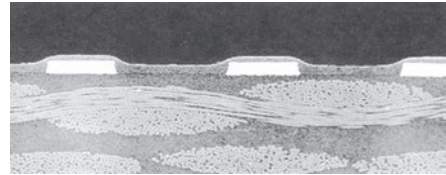
Powłoki rozpuszczalne są to powłoki, które nie topią się w temperaturze lutowania, ale ulegają rozpuszczeniu w ciekłym lucie. Do tego typu kategorii powłok należą powłoki ze złota i srebra, i w mniejszym stopniu powłoki z miedzi i cyny. Wszystkie rozpuszczają się w ciekłym lucie, a połączenie lutowane tworzy się między lutem i materiałem podłoża i/lub połączenie tworzy się z wytworzeniem warstwy związków międzymetalicznych. Obecność związków międzymetalicznych wpływa korzystnie na właściwości połączenia lutowanego. Czasami jednak, zbyt grube warstwy związków międzymetalicznych mogą powodować kruchość połączeń lutowanych i większą ich skłonność do pęknięcia w czasie cyklicznych zmian temperatury.

Powłoki organiczne OSP (*Organic Surface Preservative*) są najtańszym sposobem zabezpieczania lutowności PCB, ze względu na stosunkowo niski koszt pokrycia, oraz brak metalicznych odpadów poprodukcyjnych. Proces polega na zanurzeniu PCB z mozaiką miedzianą w odpowiednim roztworze organicznym, w temperaturze ok. 50 °C. Do wytwarzania powłok OSP stosowane są takie związki chemiczne, jak benzotriazole, benzimidazole, triazole, aryloimidazole. W wyniku reakcji tych związków z miedzią powstają bardzo cienkie (ok. 0,2–05 μm), przezroczyste powłoki, które tworzą na powierzchni miedzi szczelną warstwę ochronną. Bardzo cienka warstwa organiczna może jednak ulegać mechanicznym uszkodzeniom podczas operacji montażu, co degraduje jej lutowność na skutek utleniania odsłoniętej miedzi znajdującej się pod pokryciem.

Jednym z końcowych procesów technologicznych może być nakładanie maski przeciw-lutowej. Jest to termoodporna powłoka nakładana na wybrane obszary mozaiki przewodzącej, aby zapobiec osadzaniu na nich lutu podczas późniejszego lutowania. Oczywiście nie pokrywa się maską powierzchni, które powinny być przez lut zwilżane (rys. 6.30). Celem stosowania tej powłoki jest izolacja fragmentów mozaiki (rys. 6.31) i uniknięcie dzięki te-



Rys. 6.30. Obszar, który pokrywa maska przeciw-lutowa [4]



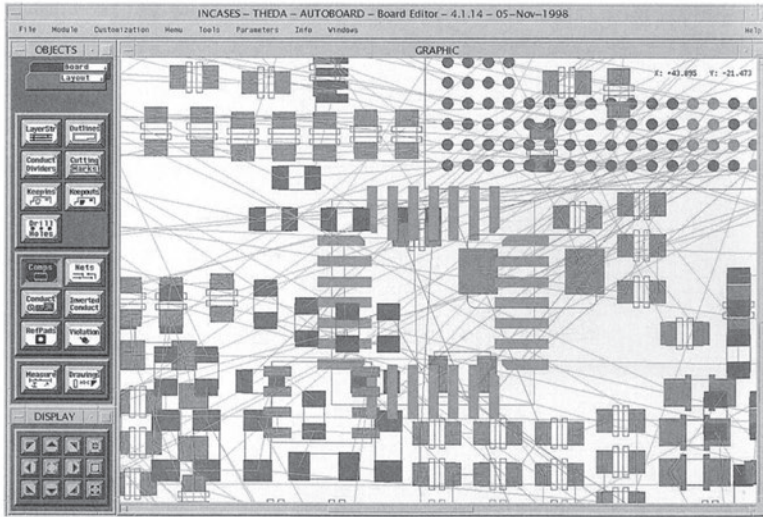
Rys. 6.31. Przekrój przez PCB z widocznymi ścieżkami przewodzącymi chronionymi maską przeciw-lutową [4]

mu zwarcia kroplami lutu ścieżek przewodzących, a także przebić między ścieżkami w warunkach dużej wilgotności lub zanieczyszczeń. Maski przeciw-lutowe wytwarza się metodą sitodruku, w której na powierzchnię płytki nanoszona jest warstwa polimeru o żądanym kształcie, która jest następnie utwardzana w podwyższonej temperaturze lub przez działanie promieniowania UV. Inna metoda (ang. *liquid photoimageable*, LPI) polega na pokryciu całej powierzchni płytki polimerami światłoczułymi. Po wysuszeniu warstwę naświetla się przez maskę o odpowiednim wzorze, co powoduje utwardzanie polimerów i umożliwia usunięcie zbędnych fragmentów, powodując odsłonięcie pól lutowniczych.

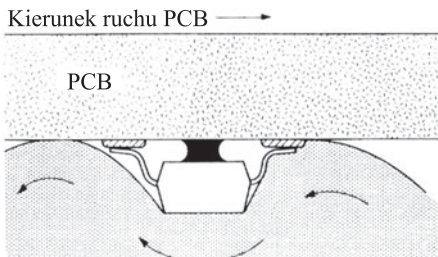
6.5. PROJEKTOWANIE MOZAIKI ŚCIEŻEK I PÓL KONTAKTOWYCH

Projektowanie mozaiki ścieżek i pól kontaktowych jest procesem wieloetapowym. Podstawą jest projekt elektryczny, a więc rozmieszczenie i elektryczne połączenia elementów. Ostateczny kształt mozaiki musi jednak uwzględniać:

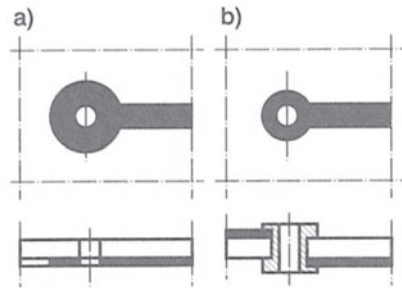
- wymaganą gęstość upakowania,
- dostępność elementów elektronicznych,
- minimalne szerokości ścieżek przewodzących i odległości między nimi,
- problemy odprowadzania ciepła,
- możliwości interferencji i zakłóceń sygnałów, pojemności sprzęgających itp,
- rodzaj technologii montażu.



Rys. 6.32. Jeden z etapów projektowania mozaiki PCB [5]



Rys. 6.33. Błąd projektowania; nieprawidłowe umiejscowienia elementu dla technologii lutowania na fali wg [4]

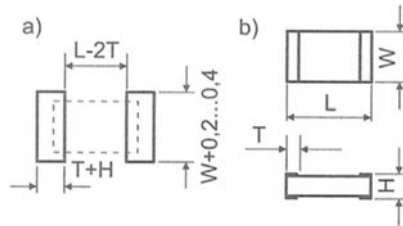


Rys. 6.34. Punkty lutownicze: a) zwykłe, b) z metalizowanym otworem [16]

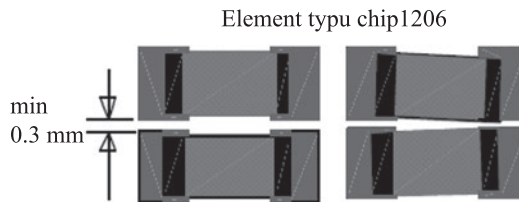
Spełnienie wszystkich wymienionych wymagań jest możliwe dzięki stosowaniu komputerowych systemów projektowania. Przykład etapu projektowania związanego z rozmieszczeniem elementów pokazano na rys. 6.32. Dodatkowo projektowanie wymaga znajomości i ograniczeń przewidywanej techniki lutowania. Na rysunku 6.33 pokazano przykład źle zaprojektowanego umiejscowienia elementu, który nie zostanie przylutowany w procesie lutowania na fali (rozd. 8.3).

W projektowaniu mozaiki zaproponowano raster, czyli siatkę modułową (którą pokazano na rys. 6.2) o podstawowej odległości 2,54 mm (0,1"). Węzły siatki wyznaczają punkty lutownicze dla montażu przewlekanego lub środki geometryczne podzespołów SMD. Punkt lutowniczy stanowi pole lutownicze, a więc jest miejscem, w którym łączy się elektrycznie i mechanicznie wyprowadzenie elementu elektronicznego z mozaiką przewodzącą. Do montażu przewlekanego najczęściej stosuje się punkty lutownicze zwykle dla obwodów jednowarstwowych, lub z metalizowanymi otworami dla płytek wielowarstwowych (rys. 6.34).

Kształt pola lutowniczego w montażu powierzchniowym zależy od kształtu kontaktów elementu. Najczęściej stosuje się prostokątne lub kwadratowe pola lutownicze, a ich wymiary muszą być dostosowane do technologii lutowania. Na rys. 6.35 pokazano wymiary pól lutowniczych dla podzespołów biernych typu *chip*, które są dostosowane do lutowania rozplwowego.



Rys. 6.35. Zalecane wymiary pól lutowniczych mozaiki PCB (a) w zależności od wielkości pól kontaktowych elementu SMD (b) [16]



Rys. 6.36. Minimalne odległości pomiędzy polami lutowniczymi sąsiadujących elementów wg [9]

Ścieżki stosuje się do przesyłania prądu stałego i sygnałów o małej częstotliwości. Minimalny przekrój poprzeczny (w praktyce – szerokość) jest zależny od przeznaczenia ścieżek. Ścieżki sygnałowe przewodzą małe prądy i ich minimalna szerokość może wynikać z możliwości technologicznych wykonania. Ścieżki zasilające są zwykle szersze, a ich szerokość wynika z dopuszczalnej obciążalności prądowej. Odległość między sąsiadującymi ścieżkami lub polami lutowniczymi jest dobierana zależnie od występującej między nimi różnicy potencjałów, a także od

- rezystancji powierzchniowej podłoża,
- warunków środowiskowych, głównie wilgotności i temperatury,
- rodzaju powłok ochronnych,
- możliwości wykonawczych.

Przy minimalnej odległości pomiędzy polami lutowniczymi sąsiednich elementów trzeba uwzględnić błędy w obsadzeniu elementów i ich przemieszczenia w procesie lutowania. Przykład zalecanych minimalnych odległości dla elementów 1206 pokazano na rys. 6.36.

7. PODSTAWY PROCESU LUTOWANIA, STOPY I PASTY LUTOWNICZE

7.1. LUTOWANIE

Lutowanie jest metodą łączenia elementów, głównie metalowych, za pomocą stopu lutowniczego (lutu) o temperaturze topnienia niższej niż temperatura topnienia metali łączonych elementów. W miejsce lutowania lut jest nakładany w postaci stałej lub stopionej, podczas gdy łączone elementy (nagrzane do temperatury przekraczającej temperaturę topnienia lutu) pozostają cały czas w stanie stałym.

Lutowanie jest najczęściej stosowane przy połączeniach elementów elektronicznych i układów scalonych do płytek obwodów drukowanych, a więc na II poziomie montażu, przy czym stosowane jest wyłącznie lutowanie miękkie o temperaturze procesu zwykle nieprzekraczającej 250 °C. Podczas montażu elektronicznego ważna jest zarówno stosunkowo niska temperatura procesu (górną granicę lutowania miękkiego określa się na poziomie 450 °C), jak i fakt, że proces ten jest odwracalny i połączenie można naprawiać bez uszkodzenia podłoża czy też podzespołów.

W procesie lutowania zespołów na płytkach obwodów drukowanych występują następujące zjawiska fizyczne:

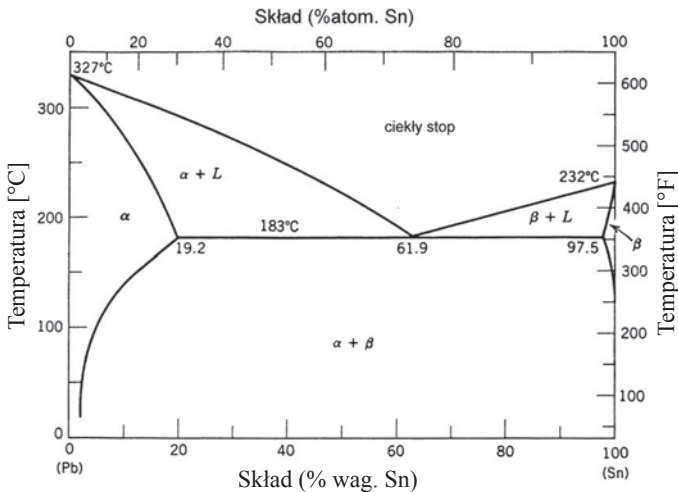
- zwilżanie pól lutowniczych i wyprowadzeń podzespołów przez ciekły lut,
- wpływanie ciekłego lutu w metalizowane otwory płytek drukowanych dzięki siłom kapilarnym i zwilżanie ścianek otworów,
- reakcje dyfuzji ciekłego lutu w łączone powierzchnie,
- rozpuszczanie metali podłoża w ciekłym lucie,
- tworzenie się związków międzymetalicznych na granicy ciało stałe (podłoże)–ciecz (lut),
- dalsza reakcja dyfuzji w ciele stałym po zastygnięciu połączenia lutowanego.

Występowanie każdego z tych zjawisk jest zależne od składu chemicznego lutu i łączonych metali, czasu trwania tych reakcji oraz temperatury stopionego lutu. W większości układów lut/metal podłoża zachodzi: zwilżanie, dyfuzja i rozpuszczanie metalu podłoża w lucie, natomiast w mniejszym stopniu powstawanie produktów reakcji międzyfazowych. Na pierwsze dwa procesy ma również wpływ skład chemiczny użytego topnika, dlatego przy lutowaniu powinno się rozważać układ lut/topnik/metal podłoża. W procesie chłodzenia następuje zestalenie powstałego połączenia lutowanego. Mimo że proces ten zatrzymuje dalsze rozpuszczanie metalu podłoża w lucie, to reakcje międzyfazowe mogą przebiegać dalej w fazie stałej, jednak w znacznie wolniejszym tempie spowodowanym nie tylko obniżeniem temperatury, ale także z powodu natury procesów dyfuzyjnych, które wolniej zachodzą w ciałach stałych niż w cieczach. Reakcje

w stanie stałym w połączeniu lutowanym prowadzą do tworzenia jednej lub kilku warstw międzymetalicznych.

7.2. MONTAŻ BEZOŁOWIOWY

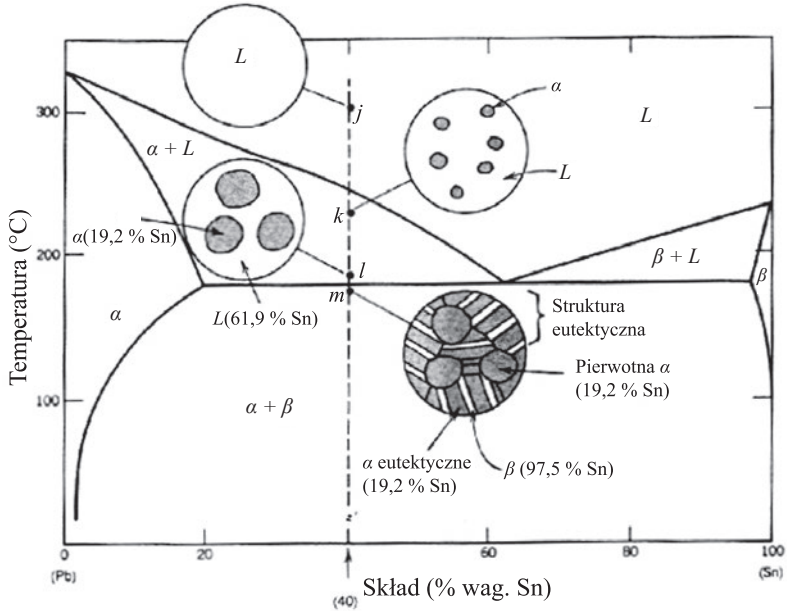
Od początku rozwoju elektroniki w montażu stosowano bliskoeutektyczne stopy lutownicze cynowo-ołowiowe. Wykres równowagi fazowej stopu SnPb pokazano na rysunku 7.1. Punkt na wykresie wskazujący na zawartość cyny 61,9% i temperaturę 183 °C nosi nazwę punktu eutektycznego. Dla zrozumienia znaczenia tego punktu, a dokładniej stopu o składzie eutektycznym, założmy, że dysponujemy stopem o zawartości ok. 40 % cyny. Jeśli obniżona zostaje temperatura (według linii kreskowej na rys. 7.2), to w trakcie krystalizacji pojawiają się mieszaniny o coraz to innym składzie. Na przykład w punkcie *l* występuje mieszanina stałej fazy α o zawartości 19,2% Sn i fazy ciekłej *L* o zawartościach 61,9% Sn. Oznacza to, że nie obserwuje się gwałtownej przemiany fazy ciekłej w fazę stałą.



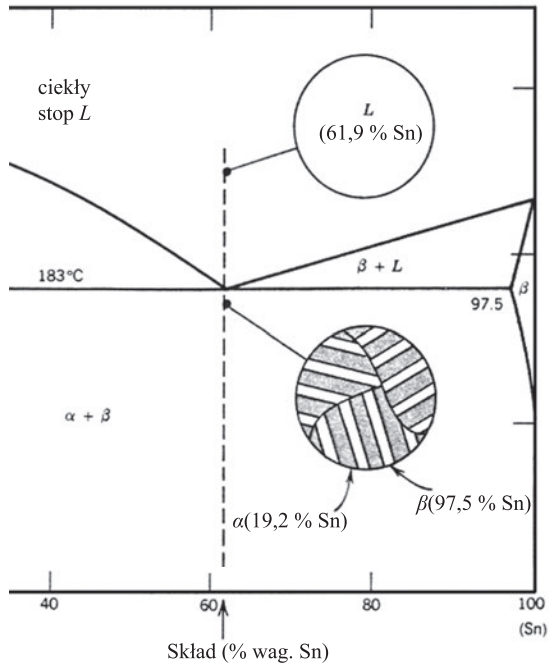
Rys. 7.1. Wykres równowagi fazowej stopu SnPb [4]

Zupełnie inaczej przebiega proces krystalizacji w punkcie eutektycznym (61,9 % Sn), w którym w temperaturze 183 °C roztwór *L* przekształca się w dwie fazy stałe α i β – mikrostrukturę złożoną z na przemian leżących warstw (rys. 7.3). Ta cecha eutektycznego stopu PbSn stanowiła o łatwości procesu lutowania w stosunkowo niskiej temperaturze i otrzymaniu złącza o stosunkowo dobrej wytrzymałości mechanicznej.

Niestety, wadą tego stopu jest obecność ołowiu, a toksyczne skutki działania Pb na organizm ludzki są bezdyskusyjne. Szczególnie szkodliwe dla zdrowia człowieka są opary ołowiu, których długotrwałe działanie może mieć nieodwracalne skutki w postaci uszko-



Rys. 7.2. Mikrostruktura stopu SnPb o zawartości Sn około 40% [19]



Rys. 7.3. Mikrostruktura eutektycznego stopu SnPb [19]

dzenia centralnego systemu nerwowego, zahamowania wytwarzania hemoglobiny oraz osłabienia zdolności reprodukcyjnych.

Pierwsze realne propozycje ograniczenia stosowania miękkich stopów zawierających ołów pojawiły się w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku w wielu krajach europejskich, Stanach Zjednoczonych i Japonii. W Europie, 27 stycznia 2003 roku, Parlament Europejski i Rada przyjęły dwie dyrektywy zmierzające do eliminacji na terenie Unii Europejskiej ołowiu w produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego przez zastąpienie tego pierwiastka innymi materiałami; dyrektywę RoHS o ograniczeniu wykorzystania w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym niektórych substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko oraz dyrektywę WEEE o użytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym. W dokumentach jest także mowa o innych szkodliwych substancjach.

Zgodnie z art. 4 ust. 1. dyrektywy RoHS, Państwa Członkowskie Unii Europejskiej, miały zapewnić, iż od dnia 1 lipca 2006 r. nowy sprzęt elektryczny i elektroniczny wprowadzany do obrotu nie zawiera ołowiu, kadmu, sześciowartościowego chromu, polibromowego difenyłu lub polibromowego eteru fenyloвого. Zgodnie z art. 2 ust. 1. dyrektywy RoHS, zawarte w niej przepisy stosuje się do sprzętu elektrycznego i elektronicznego zaliczającego się do następujących kategorii:

- wielkogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego,
- małogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego,
- sprzęt teleinformatyczny i telekomunikacyjny,
- sprzęt konsumencki,
- sprzęt oświetleniowy,
- narzędzia elektryczne i elektroniczne (z wyjątkiem wielkogabarytowych, stacjonarnych narzędzi przemysłowych),
- zabawki, sprzęt rekreacyjny i sportowy,
- automaty do wydawania.

Przepisy dyrektywy stosuje się również do żarówek elektrycznych i opraw oświetleniowych stosowanych w gospodarstwach domowych.

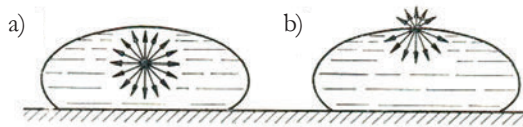
Wymiernym skutkiem dyrektywy RoHS jest wprowadzenie zakazu stosowania ołowiu w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym, co spowodowało, że coraz powszechniej używa się określenia elektronika bezołowiowa (ang. *Lead-free Electronics*), a w odniesieniu do montażu elektronicznego – montaż bezołowiowy.

Prace badawcze nad poszukiwaniem stopu lutowniczego bezołowiowego, który mógłby stanowić zamiennik dla stopu cynowo-ołowiowego rozpoczęły się w wielu krajach już na początku lat 90. ubiegłego stulecia. Prace opierały się na założeniu, że luty SnPb zostaną bezpośrednio zastąpione stopami lutowniczymi bezołowiowymi. Oznaczało to między innymi kompatybilność z dotychczas stosowanymi stopami w zakresie temperatur topnienia, zwilżalności materiałów lutowanych, dostępności składników stopów, kosztów wytwarzania i użycia, technologii lutowania. Niestety, pojawiły się techniczne bariery ograniczające taką prostą wymianę. Podstawową barierą stanowi temperatura lutowania, która dla większości stopów lutowniczych bezołowiowych jest przynajmniej o kilka-

naście stopni wyższa. Ponadto jest zależna od stosowanej technologii. Ponadto pojawiają się wady – zarówno wpływające na niezawodność połączeń, ujawniające się w trakcie eksploatacji urządzeń elektronicznych, jak i defekty dyskwalifikujące złącza pod względem elektrycznym bądź mechanicznym bezpośrednio po procesie montażu. Należy także pamiętać, że montaż bezołowiowy wymaga eliminacji ołowiu nie tylko ze stopów lutowniczych, ale także z powłok na ścieżkach płytek obwodów drukowanych – co stwarza wymagania stosowania innych materiałów i nowych technologii nanoszenia tych powłok. Ten sam problem dotyczy wyprowadzeń elementów elektronicznych. Do rodzaju lutowanych powierzchni i rodzaju stopów lutowniczych należy dobierać odpowiednie pod względem technologicznym topniki, przy czym muszą one spełniać obowiązujące wymagania dotyczące ochrony środowiska.

7.3. ZWILŻANIE

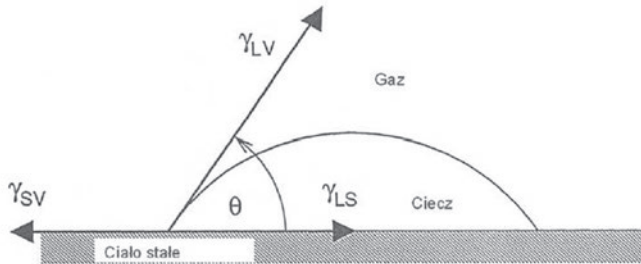
Trwałość połączenia lutowanego w dużym stopniu zależy od przylegania lutu do łączonych powierzchni. Związane jest to z właściwościami zwilżającymi lutu, czyli zdolnością do pokrywania powierzchni łączonych elementów cienką, równomierną i ciągłą powłoką. Przy założeniu, że powierzchnia metalu przeznaczonego do lutowania jest doskonale oczyszczona i że nie zachodzi jej wtórne utlenienie, można przyjąć, że w procesie lutowania biorą udział trzy elementy: lut (metal), podłoże (metal bazowy) i topnik lub atmosfera, w której proces się odbywa (powietrze, pary topnika). W temperaturze lutowania metal bazowy, który charakteryzuje się relatywnie wysoką temperaturą topnienia jest ciałem stałym, roztopiony lut – cieczą, a topnik, który w normalnych warunkach jest ciekły, w temperaturze lutowania jest gazem.



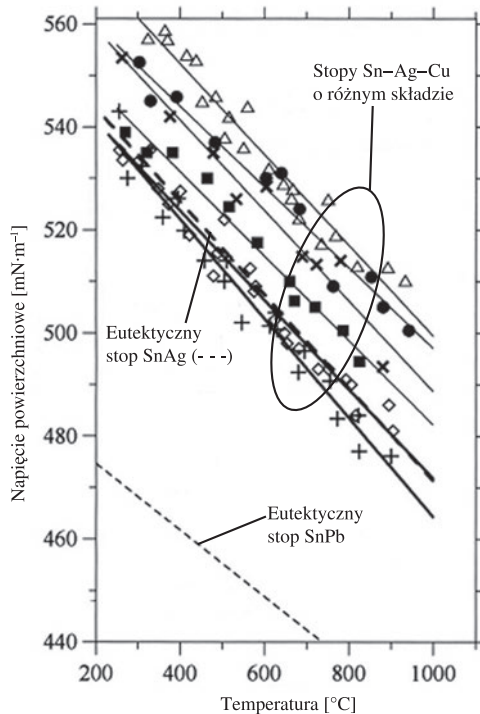
Rys. 7.4. Oddziaływanie sił spójności na cząsteczkę:
a) wewnątrz cieczy, b) na powierzchni cieczy [2]

Zjawisko zwilżania jest wynikiem zmian energii powierzchni ciała stałego oraz energii międzyfazowej pomiędzy ciekłym lutem a ciałem stałym przed i po procesie lutowania. Warunkiem dobrego zwilżania jest, aby siły wzajemnego przyciągania między cząsteczkami ciekłego lutowanego metalu a cząsteczkami na powierzchni lutowanych metali były większe od sił spójności pomiędzy cząsteczkami ciekłego lutowanego metalu. Siły spójności działające między cząsteczkami ciekłego lutowanego metalu ujawniają się na powierzchni styku z otaczającymi gazami i/lub podłożem. Tylko tam siły te nie równoważą się wzajemnie. Energia swobodna powierzchni ciała stałego jest zatem większa niż energia wewnątrz z powodu przerwanych połączeń na powierzchni (rys. 7.4).

W warunkach równowagi termodynamicznej kropla lutu leżąca na poziomej, metalicznej powierzchni w atmosferze topnika, stanowi układ trzech faz: stała (element lutowany–metal bazowy), ciekła (ciekły lut), gazowa (powietrze atmosferyczne lub topnik) (rys. 7.5). Przyrost energii na jednostkę powierzchni nazywa się napięciem powierzchniowym. Można mówić o napięciu powierzchniowym lutu w zetknięciu z powietrzem bądź o napięciu powierzchniowym ciała stałego z ciekłym litem. Ogólnie, napięcie powierzchniowe stopów lutowniczych zmniejsza się liniowo wraz ze wzrostem temperatury, aż do osiągnięcia przez ciecz temperatury wrzenia (rys. 7.6).



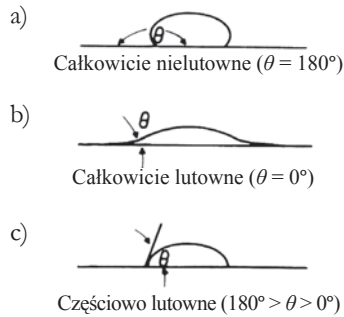
Rys. 7.5. Schemat termodynamicznej równowagi zwilżania [20]



Rys. 7.6. Wpływ temperatury na wartość napięcia powierzchniowego stopu wg [18]

Z rysunku 7.5 wynika, że wektory trzech sił wynikających z istnienia napięcia powierzchniowego są istotne dla utrzymania układu w stanie równowagi:

- wektor γ_{LV} , który jest napięciem powierzchniowym między ciekłą i fazą gazową, działający stycznie do krzywizny cieczy,
- wektor γ_{LS} , który jest napięciem międzyfazowym między ciekłym lutem i metalem bazowym,
- wektor γ_{SV} , który jest napięciem międzyfazowym między bazowym metalem i fazą gazową.



Rys. 7.7. Zależność między kątem zwilżenia a stopniem zwilżenia [20]

Stan równowagi tego układu opisuje równanie Younga:

$$\gamma_{SV} + \gamma_{LS} + \gamma_{LV} = 0$$

Dwa wektory napięć międzyfazowych (γ_{LS} i γ_{SV}) działają wzdłuż powierzchni metalu bazowego, lecz są skierowane w przeciwnych kierunkach. Wielkość energii międzyfazowej jest wynikiem właściwości materiałów biorących udział w procesie. Oba napięcia międzyfazowe związane są z fazą stałą, która wymaga dużej energii do zmiany swoich wymiarów. W przeciwieństwie do napięcia powierzchniowego cieczy, napięć międzyfazowych (jeśli występują samodzielnie) nie da się określić przez fizyczne zmiany w układzie. Z wykresu sił otrzymuje się zależność:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos \theta$$

gdzie: γ_{SV} jest siłą, która powoduje rozpliw cieczy po powierzchni ciała stałego i jest nazywana siłą zwilżania. Zwilżanie będzie występowało, jeśli γ_{SV} będzie większe od kombinacji γ_{LS} i $\gamma_{LV} \cos \theta$. Zależność między tymi siłami może być określona z wielkości kąta dwuściennego θ . Analizując dwie skrajne wartości dla kąta θ : 180° i 0° , w pierwszym wypadku nie będzie żadnego zwilżenia (rys. 7.7a), a w drugim – nastąpi całkowite zwilżenie powierzchni przez lut (rys. 7.7b). Częściowe zwilżenie będzie zachodziło wówczas, gdy kąt θ będzie mniejszy od 180° , a większy od 0° (rys. 7.7c).

Z powodu zbyt krótkiego czasu lutowania i natychmiastowego ochłodzenia (do zestalenia) lutowanych elementów podczas procesu lutowania rzadko zachodzi rozpatrywany powyżej stan równowagi termodynamicznej. W takich warunkach z wartości kąta zwilżania można uzyskać dodatkowe informacje.

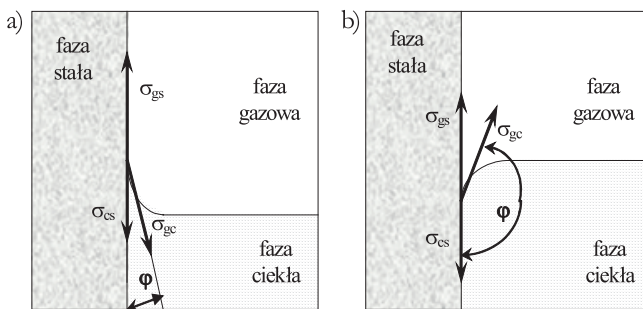
- Jeżeli kąt θ wynosi powyżej 90° , a lutowane elementy zostały ochłodzone po osiągnięciu równowagi termodynamicznej, to warunek $\theta > 90^\circ$ wskazuje na brak powinowactwa do zwilżania między powierzchnią cieczy a powierzchnią ciała stałego, czyli nie nastąpi zwilżenie.

- Jeżeli kąt θ wynosi powyżej 90° , a lutowane elementy zostały ochłodzone przed osiągnięciem równowagi termodynamicznej, to warunek $\theta > 90^\circ$ wskazuje na proces zwany odwilżaniem. Powierzchnia najpierw ulega zwilżeniu, a następnie (z powodu napięcia międzyfazowego ciała stałe/ciecz lub fizycznego ochłodzenia) lut cofa się ze zwilżonej powierzchni i odsłania częściowo metal bazowy.

- Gdy kąt θ zawarty jest w granicach od 90° do 75° , wskazuje on na częściowe zwilżenie. Ten typ zwilżenia nie jest akceptowany w praktyce.

- Gdy kąt θ jest mniejszy od 75° , wskazuje on na dobre zwilżenie. Kiedy wymagana jest wysoka jakość połączenia lutowanego, kąt θ powinien być mniejszy niż 55° ; najlepsze zwilżenie osiąga się, gdy kąt θ jest zawarty między 0 a 25° .

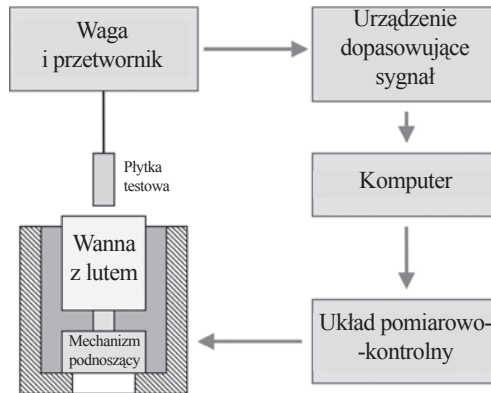
Czystość powierzchni lutowanych części w znacznym stopniu decyduje o zwilżalności. Zanieczyszczenia tlenkami lub tłuszczem mogą wywołać znaczne zwiększenie kąta zwilżania. Usuwanie tlenków przez mechaniczne lub chemiczne oczyszczanie przed lutowaniem nie jest do końca skuteczne, gdyż powierzchnie te ponownie ulegają utlenieniu przy podgrzewaniu i lutowaniu. Dlatego też lutowanie prowadzi się zwykle w obecności topników, które pomagają w oczyszczaniu powierzchni, oraz dodatkowo zabezpieczają lut i lutowane powierzchnie przed utlenianiem w trakcie procesu w wysokiej temperaturze.



Rys. 7.8. Ocena zwilżalności; a) powierzchnia zwilżona, $\theta < 90^\circ$
b) powierzchnia niezwilżona, $\theta > 90^\circ$ [18]

Metoda oceny zwilżania wynikająca bezpośrednio ze stanu równowagi termodynamicznej trzech faz (rys. 7.5) powinna polegać na pomiarze kąta zwilżania. W rzeczywistych warunkach trudno jest jednak precyzyjnie zmierzyć wartość tego kąta, chociaż jego ocena

wzrokowa umożliwia taką ocenę faktu zwilżania (rys. 7.8a) lub niezwilżania (rys. 7.8b) powierzchni przez lut. Z tego względu mierzy się raczej siłę i czas zwilżania. Do takich pomiarów została opracowana metoda zanurzania i wyciągania próbki metalu w ciekłym lucie, tzw. metoda meniskograficzna. Tą metodą próbkę metalu pokrytą topnikiem zawieszają na czułej wadze (zwykle z sensorycznym pomiarem siły) i następnie zanurza pionowo z określoną prędkością na ustaloną głębokość w kąpieli lutowniczej o kontrolowanej temperaturze. Na rysunku 7.9 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego.



Rys. 7.9. Schemat blokowy meniskograficznego układu pomiarowego [18]

Wypadkowa składowych pionowych sił wyporu i napięcia powierzchniowego, działających na zanurzoną próbkę jest odbierana przez przetwornik i przetwarzana na sygnał elektryczny, który jest zapisywany w sposób ciągły w funkcji czasu

$$F_r = F_w - F_g,$$

gdzie: F_r – mierzona siła wypadkowa, F_w – siła zwilżenia, F_g – siła wyporu, przy czym

$$F_w = \gamma_{LV} l \cos \theta,$$

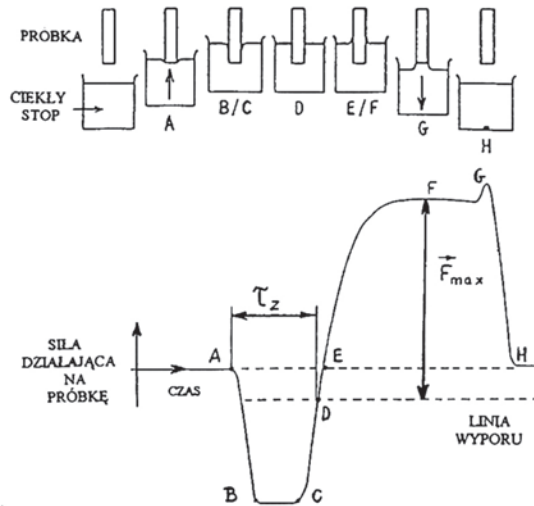
$$F_g = \rho V g.$$

W przedstawionych zależnościach przyjęto oznaczenia: γ_{LV} – napięcie powierzchniowe w układzie ciekły lut–topnik (powietrze), l – obwód badanego elementu w obszarze menisku, ρ – gęstość lutu w temperaturze próby, V – objętość części zanurzonej badanego elementu, g – przyspieszenie ziemskie.

W stanie równowagi łatwo wykazać, że

$$\cos \theta = \frac{F_r - \rho V g}{\gamma_{LV} l}.$$

Na rysunku 7.10 przedstawiono teoretyczną krzywą zwilżania. W punkcie *A* próbka styka się z powierzchnią lutu, zostaje zamknięty obwód elektryczny i następuje rejestracja przebiegu zwilżania. Odcinek *AB* odpowiada etapowi zanurzania próbki w kąpieli lutowej. W punkcie *C* zaczyna się zwilżanie. Punkt *D* odpowiada momentowi, w którym składowa pionowa siły zwilżania równa się zeru (kąt zwilżania $\theta = 90^\circ$), a na próbkę działa tylko siła równa wyporowi hydrostatycznemu. Odcinek *DF* odpowiada etapowi wzrostu zwilżania, a kąt zwilżania θ maleje. Po ustaleniu się równowagi termodynamicznej układu: próbka metalowa – ciekły lut – topnik, siła zwilżania osiąga wartość maksymalną (punkt *F*). Punkt *G* odpowiada momentowi wyciągania próbki z lutowi.



Rys. 7.10. Przebieg procesu zwilżania [18]

W badaniach meniskograficznych podstawowymi parametrami określającymi właściwości zwilżania podłoża przez stopy lutowicze są:

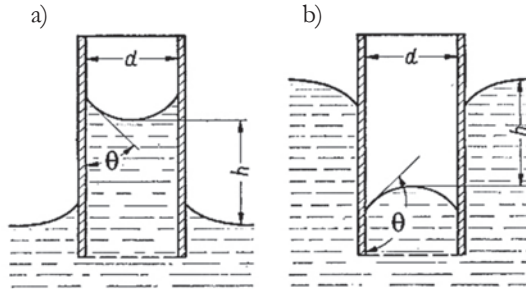
- czas zwilżania τ_z , definiowany jako czas upływający od momentu zetknięcia się pokrytej topnikiem próbki z powierzchnią ciekłego lutowi do momentu, w którym siła działająca na próbkę jest równa sile wyporu hydrostatycznego,
- maksymalna siła zwilżania F_{\max} .

Za kryterium dobrej zwilżalności podłoża miedzianego przez stop lutowiczy przyjmuje się czas zwilżania poniżej 2 s, a wartość siły powinna wynosić przynajmniej 2/3 maksymalnej siły zwilżania F_{\max} określonej dla lutowi SnPb z topnikiem kalafoniowym.

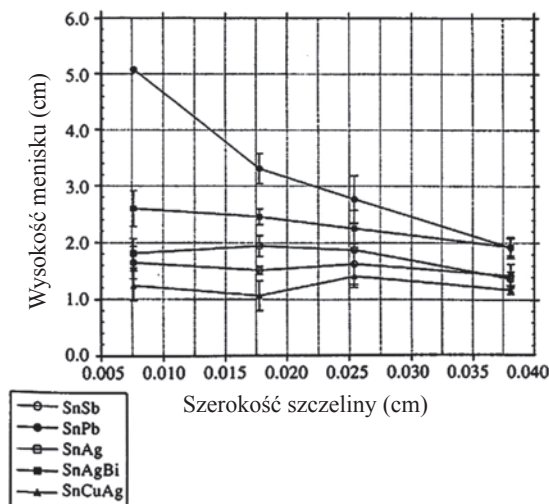
7.4. PROCESY KAPILARNE

Zwilżalność otworów metalizowanych płytek drukowanych ściśle łączy się ze zjawiskiem włoskowatości występującym wyraźnie w kapilarach. Zjawisko włoskowatości po-

lega na wpływaniu ciekłego lutu w wąskie otwory mające charakter kapilar. Ciekły lut, zwilżając metal kapilary, podnosi się w niej ponad poziom lutu w wannie lutowniczej, tworząc menisk wklęsły (rys. 7.11a), a w wypadku braku zwilżalności opada poniżej poziomu ciekłego lutu w wannie i tworzy menisk wypukły (rys. 7.11b).



Rys. 7.11. Zjawisko włoskowatości w warunkach: a) lutu zwilżającego, b) lutu niezwilżającego ścianek kapilary [4]



Rys. 7.12. Zależność wzniosu lutu w kapilarze od wielkości otworu [18]

Wysokość wzniosu ciekłego lutu jest tym większa, im mniejsze są: średnica otworu, gęstość lutu oraz im mniejszy jest kąt zwilżania ($\cos\theta$), czyli im łatwiej zachodzi zwilżanie. Ta prawidłowość dobrze się sprawdzała przy lutowaniu otworów stopem SnPb, w którym stwierdzono liniową zależność wysokości wzniosu lutu w kapilarze od zmniejszania średnicy kapilary. Nieco inaczej zachowują się luty bezołowiowe, które nie wykazują tak dużej zależności wysokości wzniosu od geometrii kapilary, jak na przykład lut SnPb (rys. 7.12).

7.5. PROCESY DYFUZYJNE

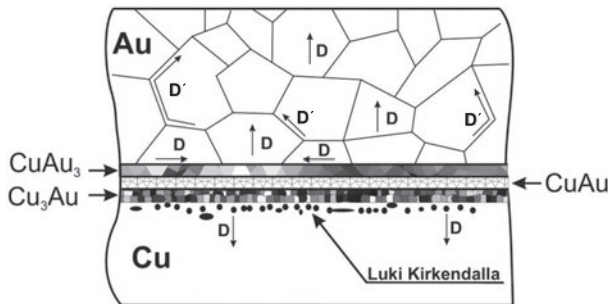
Ważną rolę w procesie lutowania odgrywa zjawisko dyfuzji zachodzące między ciekłym lutem i materiałem lutowanym, polegające na przemieszczaniu się atomów składników lutu w głąb metali bazowych i składników metali bazowych do lutu. Dyfuzja zachodzi w obszarze międzyfazowym, który jest definiowany jako fragment przestrzeni trójwymiarowej, leżący na styku przylegających do siebie ciał. Dyfuzja zachodzi we wszystkich stanach skupienia, z tym że w gazach zachodzi najszybciej, a w ciałach stałych najwolniej. W metalach dyfuzja zachodzi wzdłuż granic ziaren, wzdłuż dyslokacji w kryształach, a także równoległe do powierzchni metalu.

Duży wpływ na dyfuzję ma temperatura. Ze wzrostem temperatury gwałtownie rośnie współczynnik dyfuzji. Zależność tę opisuje wzór

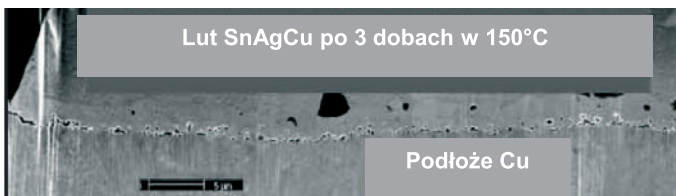
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right)$$

gdzie D_0 – stała niezależna od temperatury, Q_d – energia aktywacji dla dyfuzji [eV/atom], R – stała gazowa = $8,62 \times 10^{-5}$ eV/atom, T – temperatura [K].

Energia aktywacji może być traktowana jak energia potrzebna do dyfuzyjnego przemieszczenia 1 mola atomów.



Rys. 7.13. Dyfuzja w układzie Cu/Au; objętościowa (D), na granicach ziaren (D') i powstanie luk Kirkendalla [19]

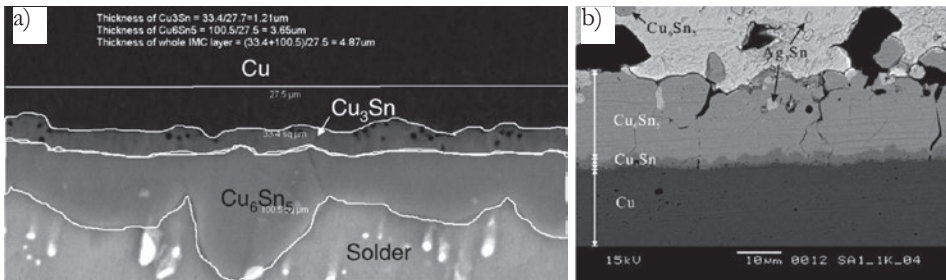


Rys. 7.14. Przykład pustek Kirkendalla w połączeniu lutowanym wg [21]

Zjawiska dyfuzji powodują zwykle wzrost wytrzymałości mechanicznej złącza, ale jedynie w warunkach, kiedy szybkość dyfuzji obydwu składników jest jednakowa. Jeżeli jeden z elementów dyfunduje szybciej niż drugi, tworzą się luki (ang. *voids*) w materiale o wyższej szybkości dyfuzji. Zjawisko to nazywane jest efektem Kirkendalla. Wada ta wyraźnie występuje w połączeniach CuAu (rys. 7.13). Dyfuzja Cu \rightarrow Au jest znacznie szybsza niż dyfuzja w przeciwnym kierunku. Atomy Cu pozostawiają więc wakansy w sieci krystalicznej. Te pustki, gromadząc się tworzą linię mikrodziur, które obniżają mechaniczną stabilność połączeń lutowanych. Przykład połączenia lutowanego z taką wadą pokazano na rys. 7.14.

7.6. ZWIĄZKI MIĘDZYMETALICZNE

Najważniejszą cechą obszaru międzyfazowego lut/metal bazowy jest to, że zachodzi w nim nagła zmiana właściwości fizycznych lub chemicznych, charakterystycznych dla każdego z przylegających do siebie ciał – w obszarze tym tworzą się związki międzymetaliczne. Warstwa związków międzymetalicznych (ang. *InterMetalic Compound*, IMC) składa się z jednego lub więcej elementów pochodzących z każdej warstwy, tj. lutu i łączonych elementów (podłoży). Z fizycznego punktu widzenia, związki międzymetaliczne mogą się tworzyć wtedy, kiedy dwa metalowe elementy mają ograniczoną wzajemną rozpuszczalność, przy czym rozpuszczalność jest niezbędna do zainicjowania procesu tworzenia IMC w połączeniu lutowanym. Rozpuszczalność jest przemianą chemiczną, która zachodzi w stopionych materiałach.



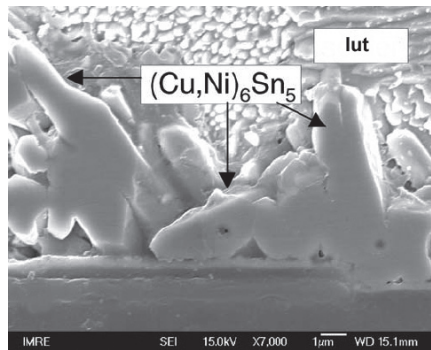
Rys. 7.15. Związki międzymetaliczne powstałe pomiędzy podłożem miedzianym i stopem lutowniczym bogatym w cynę; stop SnAgCu – po procesie wygrzewania w temperaturze 150 °C przez 100 godzin (a), stop SnAg – 170 °C, 1000 godzin (b) [21]

Powstające związki mają nowe składy, o stechiometrycznych stosunkach elementów dwuskładnikowych, a ich struktury krystaliczne różnią się od struktur tworzących je elementów. Związki międzymetaliczne mają zwykle budowę związków atomowych, charakteryzujących się wiązaniami kowalencyjnymi, dlatego często są bardziej kruche niż czyste metale, ale mogą też charakteryzować się większą wytrzymałością mechaniczną od czystych metali.

W tradycyjnych połączeniach lutowanych w elektronice, w tym z użyciem stopów bezołowiowych, najczęściej występującym IMC jest związek międzymetaliczny cyny i miedzi. Ten związek tworzy się z cyny obecnej w lutcie i miedzi z podłoża podczas lutowania. W czasie gdy lut jest stopiony cyna i miedź rozpuszczają się w sobie i tworzą jednorodny związek Cu_6Sn_5 . W czasie starzenia (długi czas w podwyższonej temperaturze) połączenia lutowanego tworzy się nowa warstwa Cu_3Sn , która narasta w sąsiedztwie miedzianych pól lub wyprowadzeń. Związek Cu_3Sn jest kruchy i powinno się unikać warunków powodujących jego nadmierny wzrost. Na rysunku 7.15 pokazano różne związki międzymetaliczne Cu-Sn powstałe między lutem z dużą zawartością cyny a podłożem miedzianym po lutowaniu oraz wygrzewaniu w różnych temperaturach i różnym czasie.

Tabela 7.1. Termodynamicznie stabilne związki międzymetaliczne

System	Temperatura eutektyki [°C]	Termodynamicznie stabilne związki międzymetaliczne
Sn-Ag	221	Ag_3Sn
Sn-Au	217 (Sn10Au), 280 (Sn20Au)	AuSn , AuSn_2 , AuSn_4
Sn-Ni	–	Ni_3Sn_4 , Ni_3Sn_4
Sn-Pd	–	Pd_3Sn , Pd_2Sn , Pd_3Sn_2 , PdSn , PdSn_2 , PdSn_4
Sn-Pt	232	Pt_3Sn , PtSn , Pt_2Sn_3 , PtSn_4
Sn-Cu	227	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Cu_4Sn , Cu_3Sn_8
Sn-Zn	199	Cu_5Zn_8 , CuZn
In-Cu	155	Cu_9In_4 , Cu_3In
Sb-Zn	–	ZnSb , Zn_4Sb_3 , Zn_3Sb_2
Sn-Sb	234	Sn_3Sb_4 , Sn_4Sb_5 , SnSb , Sn_3Sb_2 , Sn_2Sb



Rys. 7.16. Związek metaliczny powstały na warstwie miedzi z dodatkiem niklu [29]

Zawartość niklu w warstwie podkontaktowej tworzy barierę hamującą nadmierny wzrost związków CuSn . Jednak powstające w takich warunkach IMC (w formie kolumn – rys. 7.16) są kruche i osłabiają złącze. Także bezołowiowe powłoki wykonane z meta-

li szlachetnych (jak srebro, złoto, czy pallad), osadzone na miedzi czy niklu również podlegają procesowi rozpuszczania, a stopień rozpuszczania jest zależny od składu podłoża i lutu, czystości chemicznej lutu oraz szybkości i temperatury zachodzenia procesu.

W tabeli 7.1 zebrano termodynamicznie stabilne związki międzymetaliczne, które mogą powstawać między cyną a innymi metalami przy formowaniu połączeń lutowanych. Przy stosowaniu innych metali wchodzących w skład stopów lub podłoży mogą powstawać i inne IMC. Dwa z nich, In-Cu i Sb-Zn, także wymieniono w tabeli 7.1.

7.7. STOPY LUTOWNICZE BEZOŁOWIOWE

Eliminacja ołowiu ze składu stopów lutowniczych w znacznym stopniu ograniczyła liczbę metali, które mogą być składnikami takich stopów. Lista możliwych składników lutów do montażu elektronicznego zawiera głównie cynę (Sn), miedź (Cu), srebro (Ag), a także bizmut (Bi), antymon (Sb), ind (In), cynk (Zn) i aluminium (Al). Stopy stanowiące kompozycje tych metali o różnej procentowej zawartości składników są opatentowane, dlatego obecnie tworzenie nowych stopów jest niezwykle trudne. Ograniczeniem jest tutaj zakres temperatur topnienia preferowany do montażu elektronicznego zależny z jednej strony od warunków pracy montowanych urządzeń, a z drugiej – wytrzymałości temperaturowej elementów. Ograniczeniem są także koszty i dostępność składników stopów. Ponadto trzeba sobie zdawać sprawę z tego, że zawartość składników stopowych w stopach lutowniczych jest określana z ograniczoną dokładnością. Według normy ANSI J-STD-006 dla dodatków stopowych o zawartości poniżej i powyżej 5% tolerancja wynosi odpowiednio $\pm 0,2$ i $\pm 0,5\%$. Oznacza to, że im więcej składników stopowych, tym większe możliwości odstępstw od nominalnych właściwości stopu o określonym oznaczeniu. Dodatkowo, większość zastrzeżeń patentowych dotyczy nie tylko składów stopów, ale także złączy wykonanych z ich użyciem.

Główną przyczyną eliminacji ołowiu ze składu stopów lutowniczych było stwierdzone ponad wszelką wątpliwość jego destrukcyjne oddziaływanie na centralny system nerwowy, hamowanie wytwarzania hemoglobiny i inne szkodliwe skutki dla człowieka oraz negatywne oddziaływanie na środowisko. Należy jednak zdawać sobie sprawę z tego, że i inne metale wchodzące w skład stopów lutowniczych mogą także stanowić zagrożenie. W tabeli 7.2 podano tzw. uproszczony profil toksykologiczny Pb, Sn, Ag i Cu.

Cyna jest słabo absorbowana przez układ pokarmowy. Wdychanie par cyny powoduje wymioty, objawy zmęczenia i bóle głowy. Spożycie rozpuszczalnych soli cyny prowadzi do zatrucia nerek i wątroby.

Srebro metaliczne jest w zasadzie nietoksyczne dla człowieka. Natomiast dla organizmów wodnych jest bakteriobójcze i silnie toksyczne. Szczególnie silne właściwości bakteriobójcze wykazuje srebro występujące w postaci cząstek o wymiarach nanometrycznych. Wpływ cząstek Ag o tak małych rozmiarach na organizm człowieka nie jest jeszcze poznany.

Tabela 7.2. Ocena porównawcza zagrożeń dla człowieka i środowiska metali stopów lutowanych

Zagrożenie	Ołów	Cyna	Srebro	Miedź
Uczulenie			([+])	(+)
Neurotoksyczność	++	[+]	(+)	
Mutagenność	[+]			(+)
Rakotwórczość	[+]			(+)
Zaburzenia reprodukcji	+++		(+)	
Zartucie wątroby		[+]		(+)
Zatrucie nerek		[+]		(+)
Zatrucie krwi	++			(+)
Zagrożenie dla środowiska	++	++	+++	++

[+] skutki powodowane przez związki, a nie metale

(+) słabe lub niepewne skutki

++ istotność skutków

Miedź jest niezbędnym do życia pierwiastkiem obecnym w organizmie człowieka, zwierząt i roślin. W organizmie ludzkim jest gromadzona głównie w wątrobie, przy czym jej poziom jest samoczynnie regulowany. Ostre zatrucia mogą powodować uszkodzenia nerek i wątroby.

Tabela 7.3. Skład chemiczny i właściwości termiczne bezolowiowych stopów lutowanych

Nazwa stopu	Sn %	Cu %	Bi %	In %	Ag %	Sb %	Cd %	Temperatura °C	
								Sol.	Liq.
In48Sn	48,0			52				118	e ¹⁾
100Sn	99,9							232	mp ²⁾
Sn0,7Cu	99,3	0,7						227	e
Sn4Ag	96,3				3,7			221	e
Sn3Ag0,8Cu0,5Sb	96,3	0,7			2,5	0,5		210	216
Sn5Ag	95,0				5,0			221	245
Sn4Ag1Cd	95,0				4,0		1,0	216	219
Sn5Sb	95,0					4-6		235	240
Bi42Sn	42,0		58,0					138	e
Sn3Ag0,4Cu	96,4	0,4			3,2			217	e
Sn3Ag0,7Cu	95,5	0,7			3,8			217	e

¹⁾ Podana w kolumnie Liquidus litera „e” oznacza stop eutektyczny.

²⁾ Skrót mp oznacza tablicową temperaturę topnienia metalu.

Szereg lutów, takich jak SnAu, SnIn, SnAg, SnBi, od dawna stosowano w przemyśle elektronicznym do specjalnych zastosowań. Luty te nadal mogą być wykorzystywane w elektronice jako luty bezołowiowe. Ich zaletą jest to, że są stopami dwuskładnikowymi, a co ważniejsze, że są stopami eutektycznymi. Poszukiwania nowych stopów bezołowiowych poszły w kierunku trój-, cztero-, a nawet pięcioskładnikowych stopów na podstawie cyny, z dodatkami takich pierwiastków stopowych, jak Cu, Ag, Bi, Sb. Luty te nie są stopami eutektycznymi, są co najwyżej stopami blisko eutektycznymi, jak np. stop SnAgCu (tzw. SAC). Przykłady stopów podano w tabeli 7.3.

Do najważniejszych właściwości stopów, które decydują o ich przydatności do lutowania wyrobów elektronicznych, należą temperatura topnienia, napięcie powierzchniowe, gęstość, rozszerzalność cieplna, właściwości elektryczne i mechaniczne. Wszystkie te właściwości, dobrze poznane i udokumentowane dla eutektycznych stopów cynowo-olowiowych, są w wielu przypadkach dopiero w fazie badań i przygotowań baz danych dla stopów bezołowiowych.

7.8. TOPNIKI I ICH ROLA W TWORZENIU POŁĄCZENIA LUTOWANEGO

Wymaganą czystość łączonych powierzchni i lutu można uzyskać tylko przy lutowaniu w atmosferach obojętnych lub redukujących, w próżni, albo też używając przy lutowaniu specjalnych substancji zwanych topnikami. Działanie topników polega na rozpuszczaniu i usuwaniu tlenków i innych związków z łączonych powierzchni i ciekłego lutu oraz ochronie lutowanego obszaru przed chemicznym działaniem otaczających gazów. Nadto większość topników powoduje zmniejszenie napięcia powierzchniowego ciekłych lutów, a tym samym polepsza zwilżalność. Dzięki temu lut może swobodnie rozplýwać się i przylegać bezpośrednio do powierzchni metalu.

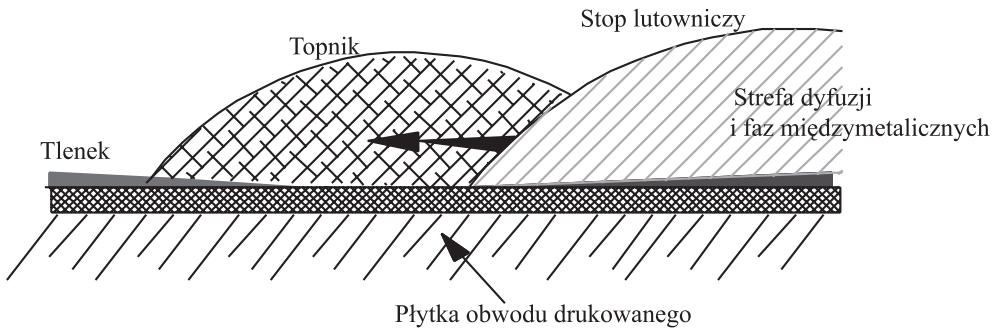
Ogólne wymagania stawiane topnikom są następujące:

- temperatura topnienia topnika powinna być niższa od temperatury topnienia lutu, a jego temperatura parowania wyższa od niej,
- w temperaturze lutowania topnik powinien być dostatecznie ciekły, aby równomiernie rozplýwać się po łączonych powierzchniach i łatwo wnikać w szczeliny złącza,
- topnik powinien być chemicznie obojętny w stosunku do lutowanych metali i lutu,
- topnik powinien całkowicie rozpuszczać lub wiązać związki niemetaliczne istniejące na powierzchni lutu i łączonych metali oraz w pełni chronić złącze przed szkodliwym działaniem otaczających gazów,
- wzajemne przyciąganie między ciekłym topnikiem a lutowanym metalem powinno być mniejsze niż przyciąganie między lutowanym metalem a ciekłym lutem, co warunkuje łatwe wypieranie topnika z powierzchni metalu przez lut,
- topnik nie powinien zmieniać składu chemicznego podczas nagrzewania w procesie lutowania,
- pozostałości topnika i rozpuszczone w nim związki niemetaliczne powinny wypływać na powierzchnię lutu w momencie zetknięcia się ciekłego lutu z metalem podłoża,

- resztki topnika i wytworzony żużel powinny łatwo dać się usunąć z powierzchni złącza,
- przy dłuższym przechowywaniu topnik nie powinien zmieniać swego składu chemicznego i właściwości wpływających na proces lutowania,
- topnik nie powinien zawierać składników szkodliwych dla zdrowia, drogich i deficytowych,
- w czasie lutowania topnik nie powinien wydzielać gazów szkodliwych dla zdrowia.

Topnik podobnie jak lut jest materiałem koniecznym do prawidłowego wykonania połączenia lutowanego. Sam topnik nie tworzy i nie wbudowuje się w połączenie, ale jest niezbędny do realizacji procesów pozwalających na jego utworzenie. Topnik w procesie lutowania spełnia trzy podstawowe funkcje (rys. 7.17):

- w pierwszej fazie lutowania (w temperaturach 100–180 °C) poprzez oddziaływanie chemiczne usuwa warstwę tlenków i innych zanieczyszczeń z powierzchni (pokryć) lutowanych elementów,
- stopiona cienka warstwa topnika zabezpiecza podgrzany obszar połączenia przed powtórным utlenianiem oraz sam roztopiony lut przed nadmiernym utlenianiem,
- zmniejsza napięcie powierzchniowe lutu i w ten sposób ułatwia jego rozplływ i zwilżanie.



Rys. 7.17. Efekt działania topnika wg [9]

Ważną dla montażu elektronicznego kategorię topników stanowią topniki kalafoniowe. Kalafonia w normalnych warunkach jest ciałem stałym. Przy podgrzaniu do 125–150 °C staje się cieczą. Podstawowym składnikiem kalafonii jest kwas abietynowy ($C_{20}H_{30}O_2$), który w temperaturze powyżej 150 °C powoduje częściowe rozpuszczanie tlenków miedzi i cyny. Topniki te opracowano pod kątem lutowania stopami eutektycznymi SnPb. Zawierają one co najmniej trzy podstawowe składniki: kalafonię, aktywator i rozpuszczalnik. Rozpuszczalnik jest nośnikiem dla dwóch pozostałych składników. Zwykle jest to alkohol izopropylowy.

Topniki oparte na czystej kalafonii są topnikami o małej aktywności (oznacza się jako *R*). Mogą być zatem stosowane do lutowania mało zanieczyszczonych powierzchni (np. złożonych). W celu zwiększenia intensywności oddziaływania topnika na lutowane

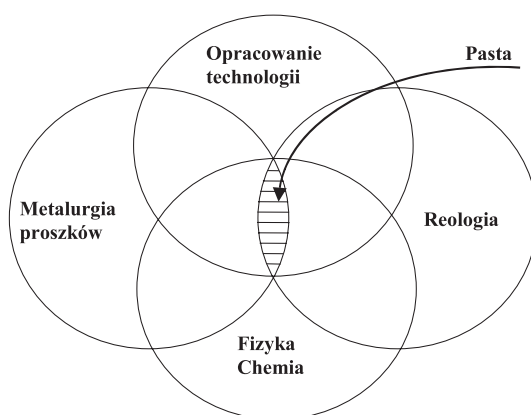
powierzchnie dodaje się aktywatory. Są to związki intensywnie reagujące z zanieczyszczeniami w podwyższonych temperaturach (np. halogenki). W zależności od ilości dodanego aktywatora topniki oznacza się jako *RMA*, *RA* lub *RSA*, co oznacza kolejno kalafonię średnio aktywowaną, aktywowaną i silnie aktywowaną.

Pozostałości topników po lutowaniu mogą być elektrycznie przewodzące i/lub korozyjne. Dlatego zalecane jest ich usuwanie po lutowaniu. W ciągu ostatniej dekady opracowano nowe rodzaje topników kalafoniowych, które nie wymagają mycia, określane jako „no-clean”. Topniki takie zawierają do 40% kalafonii. Zostały jednak tak skomponowane, że kiedy podgrzane zostaną do temperatur lutowania, wówczas organiczne molekuly polimeryzują i utwardzają się, blokując dostęp tlenu i wilgoci do połączenia. Ich pozostałości są zatem niekorozyjne i nie muszą być zmywane.

Do lutowania bezołowiowego zalecane są topniki wodne, tzw. *VOC-free (Volatile Organic Compounds)*, które zamiast lotnych rozpuszczalników organicznych zawierają wodę. Stosowanie topników na bazie wody jest korzystne ze względów bezpieczeństwa procesu lutowania, ponieważ woda, w przeciwieństwie do rozpuszczalników organicznych, jest niepalna. Obecność wody w topniku, której temperatura wrzenia jest o 20 °C wyższa od temperatury wrzenia alkoholu izopropylowego powoduje, że wymagane jest stosowanie wyższej temperatury grzania wstępnego przed lutowaniem.

7.9. PASTY LUTOWNICZE

Pasty lutownicze są homogenicznymi mieszaninami proszku lutowniczego i topnika – nośnika. Wprowadzenie do użytku bezołowiowych past lutowniczych, oprócz zmiany stopu lutowniczego wymusiło także stosowanie innych topników, od których wymaga się większej odporności termicznej i większej aktywności. Właściwości pasty są wy-



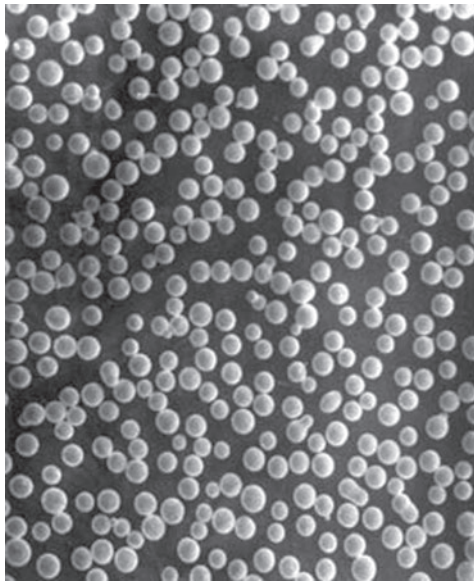
Rys. 7.18. Wpływ działań z zakresu różnych dziedzin naukowo-techniczno-technologicznych na właściwości pasty lutowniczej [18]

nikami synergicznych działań z zakresu różnych dziedzin naukowo-techniczno-technologicznych (rys. 7.18).

Właściwościami past bezołowiowych, określającymi ich jakość i decydującymi o ich właściwościach użytkowych, są podobnie jak w tradycyjnych pastach: lepkość, kleistość, koalescencja, zwilżanie i osiadanie.

Najważniejszym składnikiem pasty lutowniczej, tworzącym po przetopieniu połączenie lutowane, jest stop w postaci proszku. Podstawowymi stopami bezołowiowymi na proszki dla elektroniki są stopy $\text{Sn}(3,5-4,0)\text{Ag}(0,5-0,7)\text{Cu}$, (*SAC*), oraz eutektyczny stop $\text{Sn}_{3,5}\text{Ag}$. Stopy te, w porównaniu z dotychczas stosowanymi stopami cynowo-ołowiowymi Sn_{37}Pb i $\text{Sn}_{36}\text{Pb}_{2}\text{Ag}$, charakteryzują się wyższymi, o ok. 40–50 °C temperaturami topnienia oraz wyższym napięciem powierzchniowym. Ma to wpływ na obniżenie właściwości zwilżających stopów bezołowiowych oraz konieczność podniesienia temperatury lutowania.

Kształt i wymiar cząstek proszku wpływa w istotny sposób na jakość pasty. Preferuje się kulisty kształt cząstek proszku (rys. 7.19), ponieważ ze wszystkich brył, przy jednakowej ich objętości, kula ma najmniejszą powierzchnię, a więc zapewnia najmniejszy kontakt proszku z tlenem. Ponadto pasty o kulistym kształcie cząstek proszku lepiej drukują się przez sita i lepiej nakładają się ze strzykawek, nie powodując ich zapychania.



Rys. 7.19. Zdjęcie mikroskopowe proszku lutowniczego [18]

Od wielkości cząstek stopu lutowniczego w paście uzależniony jest sposób jej nanoszenia na podłoże: przez szablon, przez sito, czy dozownik igłowy. Odległość między osiami pól lutowniczych danego podzespołu (raster) na płytkach obwodów drukowanych

jest najważniejszym czynnikiem mającym wpływ na wybór wielkości i rozkładu granulacji cząstek proszku (tabela 7.4).

Tabela 7.4. Wybór zakresu wielkości cząstek proszku w paście w zależności od rodzaju montażu

Zakres wielkości cząstek proszku μm	Rodzaj montażu	Raster mm
45–75	standardowy	0,63–1,27
25–45	„fine pitch”	0,38–0,63
<25	„very fine pitch”	<0,38

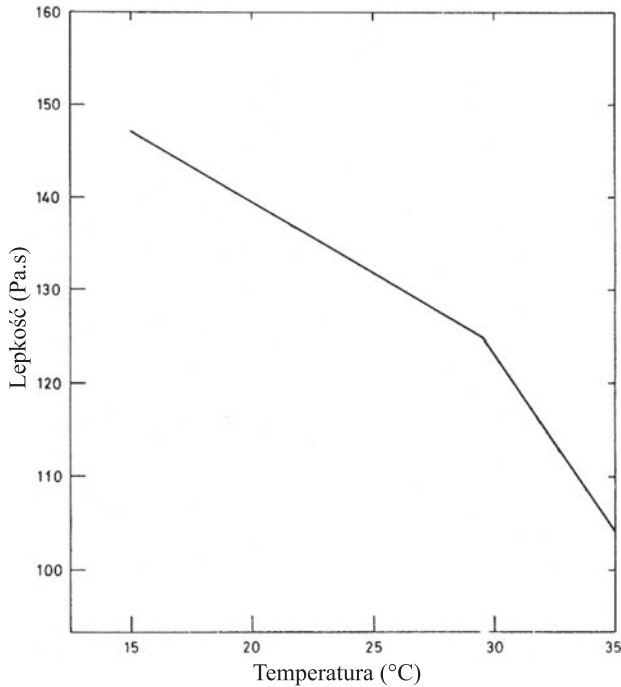
Od ilości proszku lutowniczego w paście zależą takie jej właściwości, jak lepkość, kleistość i grubość warstwy po przetopieniu, co z kolei ma wpływ na przewodność elektryczną i wytrzymałość mechaniczną połączeń lutowanych. W pastach lutowniczych zawartość stopu może się wahać od 65 do 96%, jednak w pastach przeznaczonych do nanoszenia przez szablony lub przez sito, proszek lutowniczy stanowi na ogół 88–91% masy, co odpowiada ok. 50% objętości.

Topnik odgrywa rolę nośnika proszku metalicznego, ale przede wszystkim jest składnikiem aktywnym, wpływającym na właściwości fizykochemiczne i technologiczne pasty, takie jak lepkość, tiksotropia, kleistość, koalescencja, osiadanie oraz zwilżalność powierzchni elementów łączonych, a tym samym wpływa na wynik lutowania. Ponadto pasta zawiera aktywatory, które mają za zadanie usunięcie tlenków i zanieczyszczeń z powierzchni metalowych podczas lutowania rozplwowego. Dodatki te chronią także wysoko reaktywny stop lutowniczy przed powtórny utlenieniem podczas zestalania po lutowaniu.

Lepkość jest właściwością płynów i plastycznych ciał stałych charakteryzującą ich opór wewnętrzny przeciw płynięciu, spowodowany zjawiskiem tarcia wewnętrznego. Zgodnie z laminarnym modelem przepływu lepkość wynika ze zdolności płynu do przekazywania pędu pomiędzy warstwami poruszającymi się z różnymi prędkościami. Różnice w prędkościach warstw są charakteryzowane w takim modelu przez szybkość ścinania. Przekazywanie pędu zachodzi dzięki pojawieniu się na granicy tych warstw naprężeń ścinających. Wspomniane warstwy są pojęciem hipotetycznym, bo w rzeczywistości zmiana prędkości zachodzi w sposób ciągły, a naprężenia można określić w każdym punkcie płynu. Lepkość pasty wyraźnie zmienia się z temperaturą (rys. 7.20) i dlatego należy ją aplikować w kontrolowanych warunkach. Zaleca się drukowanie pasty w warunkach wilgotności względnej od 40 do 50% i temperatury w granicach 23–26 °C. Jednostką lepkości jest Pa·s.

Tiksotropia jest z kolei właściwością niektórych rodzajów płynów i ciał plastycznych, w których występuje zależność lepkości od czasu działania sił ścinających, które na ten płyn działały. Dlatego też niektóre płyny tiksotropowe mogą stać się przez pewien czas mniej lepkie, gdy podda się je intensywnemu mieszaniu. Płyny takie po pewnym czasie (spoczynku) od momentu mieszania ponownie zwiększają swoją lepkość do normalnej wartości. Ta cecha pasty lutowniczej sprzyja jej zastosowaniu, gdyż pod wpływem nacisku (np. rakli przy drukowaniu, rozdz. 8.) pasta staje się mniej lepka i łatwiej ją wprowadza-

dzić w otwory szablonu czy precyzyjnie przez oka sita. Po procesie drukowania pasta staje się bardziej lepka i stabilnie pozostaje na polach lutowniczych.

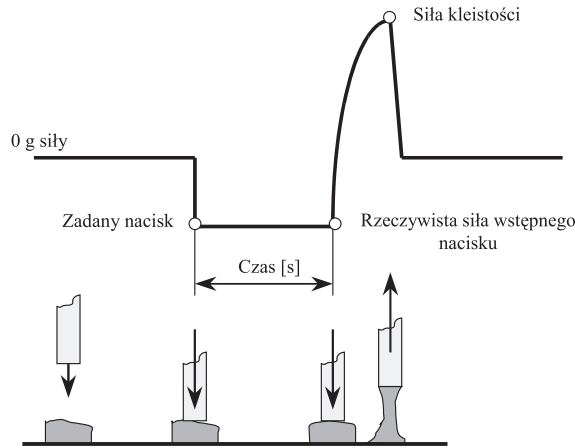


Rys. 7.20. Zależność lepkości pasty lutowniczej od temperatury wg [4]

Modyfikatory właściwości reologicznych są dodawane w celu ułatwienia nakładania pasty metodą druku i poprawy dokładności wydruku. W sposób zasadniczy chronią pastę przed rozdzieleniem się składników podczas długotrwałego przechowywania, działają stabilizująco na ich lepkość, nadają też pastom właściwości tiksotropowe.

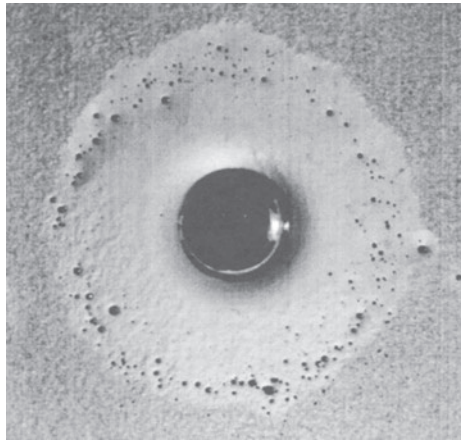
Kleistość past lutowniczych określa zdolność pasty do przytrzymywania podzespołów do podłoża (np. płytki drukowanej) w czasie montażu i podczas procesu lutowania. Kleistość pasty jest określona przez wartość siły i czasu kleistości. Siła kleistości powinna zapewniać niezmiennie położenie podzespołów w czasie od ułożenia ich na nadrukowanej paście do momentu przetopienia. Miarą siły kleistości pasty jest siła potrzebna do oderwania próbnika przyrządu pomiarowego od powierzchni pasty (np. jak na rys. 7.21).

Koalescencja definiowana jest jako rozdział układu dyspersyjnego, zwykle emulsji, na dwie fazy ciągłe, spowodowane łączeniem się (kohezją) cząstek fazy rozproszonej. W pastach lutowniczych będzie to łączenie się rozproszonych w topniku cząstek lutu (proszku) w jedną całość (kulkę) na niezwilżalnej powierzchni. Za proces kohezji ziaren proszku odpowiadają aktywatory obecne w topniku, które muszą się odznaczać aktywnością wystar-



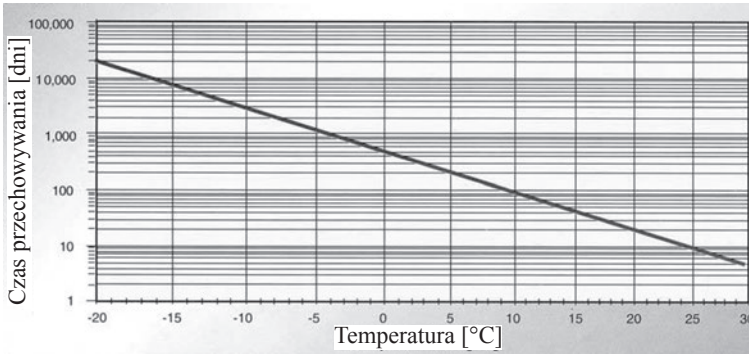
Rys. 7.21. Pomiar kleistości pasty lutowniczej [18]

czającą do redukcji lub usunięcia tlenków z powierzchni ziaren proszku. Analizując wady lutowania, powstałe podczas przetapiania past lutowniczych, do najbardziej istotnych zalicza się tworzenie się kulek lutu dookoła pól lutowniczych spowodowane brakiem wystarczającej koalescencji (rys. 7.22). Liczne, drobne kulki mogą powodować zwarcia.



Rys. 7.22. Efekt braku koalescencji pasty lutowniczej [4]

Po nadrukowaniu pasta zwykle zachowuje właściwą lepkość przez kilka godzin i w tym czasie można nakładać na niej lutowane podzespoły. Czas ten określa się jako *shelf time*, podając zwykle dodatkowo, dla jakiej temperatury przechowywania czas ten jest określany (np. *shelf time @ 25 °C*). W wypadku wadliwie nadrukowanej pasty można ją usunąć mechanicznie, zmywając alkoholem izopropylowym. Sposób i czas przechowywania pasty określa producent. W praktyce jest to zalecenie przechowywania w niskiej temperaturze, co w znaczący sposób wydłuża okres jej przydatności do użycia (rys. 7.23).



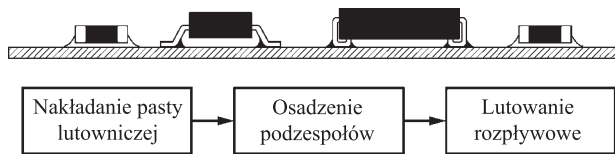
Rys. 7.23. Wpływ temperatury na czas przechowywania pasty lutowniczej [4]

Należy jednak pamiętać, że nie powinno się otwierać pojemników z pastą, a tym bardziej mieszać lub aplikować pasty, gdy nie jest ona ogrzana w całej objętości do temperatury pokojowej. Typowy czas nagrzewania i wyrównania temperatury pasty lutowniczej w pojemniku po wyjęciu jej z lodówki wynosi od 4 do 8 godzin.

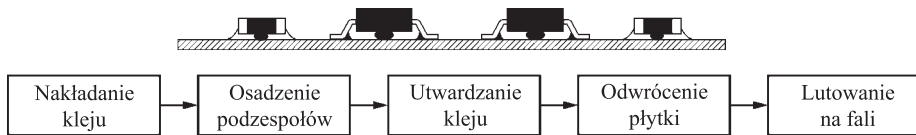
8. TECHNOLOGIE LUTOWANIA

8.1. TECHNIKI LUTOWANIA W ZALEŻNOŚCI OD KONSTRUKCJI ZESPOŁU

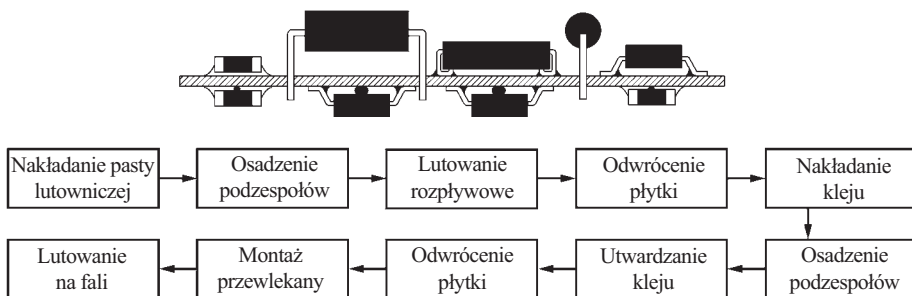
Montaż elementów elektronicznych i układów scalonych na płytkach obwodów drukowanych odbywa się głównie w procesie lutowania. W produkcji jednostkowej i w procesach naprawczych można stosować lutowanie ręczne, jednak w produkcji wielkoseryjnej stosuje się zmechanizowane metody lutowania – lutowanie zanurzeniowe (na fali) i lutowanie rozpliwowe. W metodzie lutowania na fali lut i ciepło są dostarczane jednocześnie do części przeznaczonych do łączenia. W drugiej metodzie, nazywanej lutowaniem rozpliwowym, lut aplikowany jest przed oddziaływaniem ciepła.



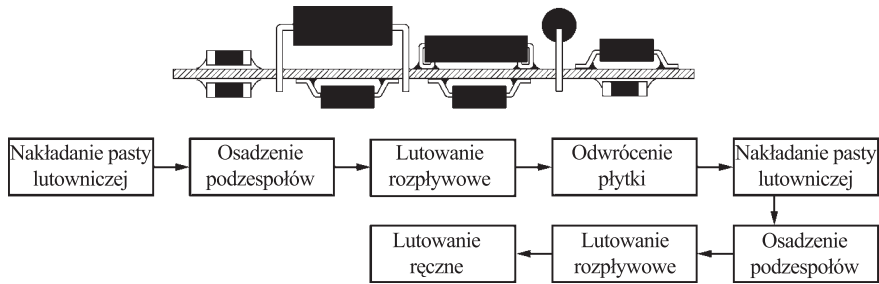
Rys. 8.1. Montaż powierzchniowy jednostronny – tylko lutowanie rozpliwowe [18, 23]



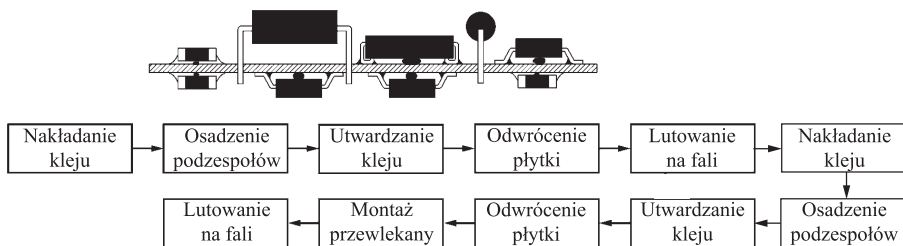
Rys. 8.2. Montaż jednostronny – tylko lutowanie zanurzeniowe (lutowanie na fali) [18, 23]



Rys. 8.3. Montaż mieszany dwustronny: lutowanie rozpliwowe i lutowanie zanurzeniowe (na fali) [18, 23]



Rys. 8.4. Montaż mieszany: lutowanie rozplywowe po obu stronach i lutowanie ręczne [18, 23]

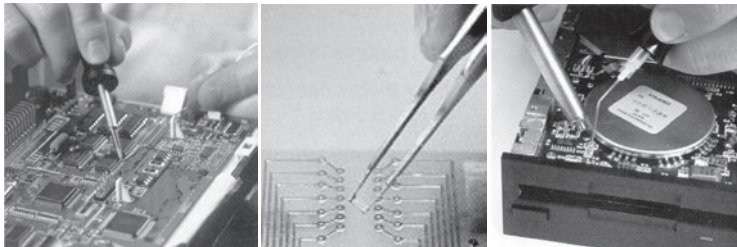


Rys. 8.5. Montaż dwustronny: lutowanie na fali [18, 23]

Przykłady podstawowych rodzajów konstrukcji zespołów, do lutowania których wykorzystuje się metodę lutowania rozplywowego, metodę lutowania na fali, lub też obie metody jedną po drugiej, przedstawiono na rysunkach 8.1–8.5. Na rysunkach podano także opis kolejnych sekwencji procesów. Jak widać, wybór metod lutowania jest zależny od rodzaju lutowanych elementów i ich rozmieszczenia na płytce obwodu drukowanego.

8.2. LUTOWANIE RĘCZNE

Lutowanie ręczne pozostaje ważnym elementem w beżołowiowym procesie montażu elektronicznego. Może ono stanowić jedyną podstawową operację lutowania podzespołów nietypowych lub podzespołów, które z różnych przyczyn nie mogły zostać przyłą-



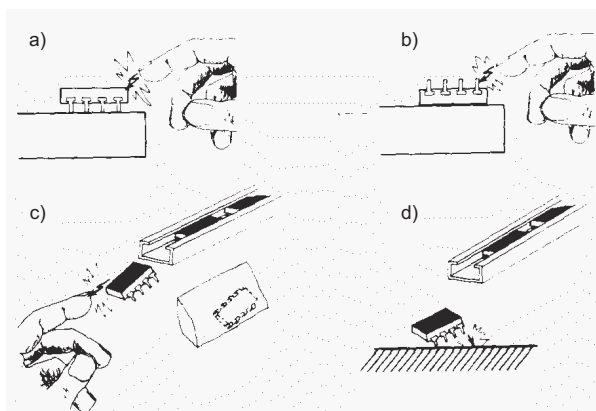
Rys. 8.6. Narzędzia do lutowania ręcznego [4, 9]

czone w procesie lutowania zmechanizowanego. Może być także częścią procesu wykonywania poprawki lub naprawy zmontowanego zespołu na płycie obwodu drukowanego.

Używając lutownicy i prostych narzędzi (rys. 8.6) przeprowadza się dołączanie końcówek podzespołów do montażu przewlekanego i końcówek podzespołów do montażu powierzchniowego, które nie są lutowane rozplwowo. Jako materiały lutownicze stosuje się drut lutowniczy i topnik, ale najczęściej topnik jest już zawarty w lucie rdzeniowym. W zasadzie nie lutuje się ręcznie podzespołów z użyciem pasty lutowniczej.

Wielkość grota lutownicy i jego temperatura decyduje o przeznaczeniu lutownicy do montażu powierzchniowego lub przewlekanego. W lutownicach do montażu powierzchniowego maksymalna średnica grota wynosi 3,0 mm, a jego temperatura jest ustawiana między 260 °C a 295 °C z tolerancją względem do nastawionej temperatury nieobciążonej lutownicy ± 5 °C. Lutowanie końcówek elementów do montażu przewlekanego wymaga stosowania lutownicy o mocy, rozmiarach grota i zakresie temperatur wskazanych przez producentów tych elementów. Jeżeli nie są dostępne takie wskazania, to zaleca się, aby lutownica pracowała przy 50 W i odpowiedniej średnicy grota, na przykład 6,5 mm, i w temperaturze z zakresu 300–375 °C z tolerancją w stosunku do nastawionej temperatury nieobciążonej lutownicy ± 5 °C.

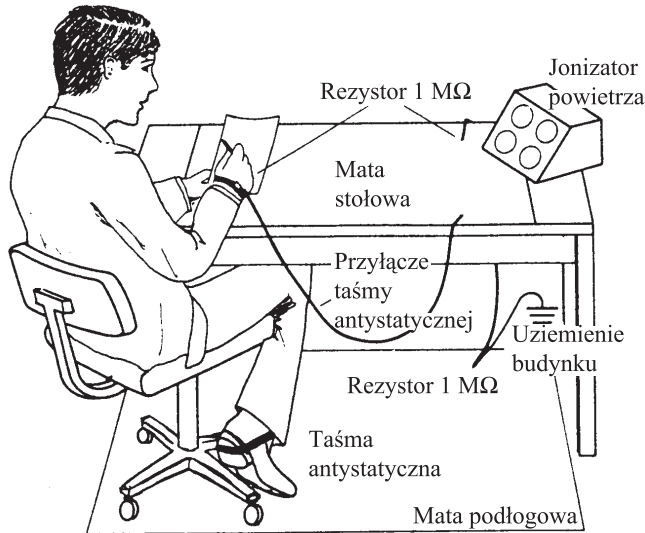
Przy lutowaniu ręcznym należy pamiętać o zagrożeniu wynikającym z możliwości wyładowań elektrostatycznych wskutek wcześniejszej generacji ładunków. Generowanie ładunków elektrostatycznych jest związane z przyłączaniem lub utratą elektronów na walencyjnych powłokach atomowych materiałów nieprzewodzących elektrycznie. Ładować elektrostatycznie mogą się zarówno elementy do montażu, jak i operator. W normalnych warunkach pracy ciało ludzkie poprzez ruch względem podłogi, mebli, ubioru, i innych nieprzewodzących elektrycznie elementów, może ładować się do wysokiego potencjału. Potencjał ten jest zależny od wielu czynników, przy czym istotną rolę może odgrywać wilgotność względna powietrza. W najbardziej niesprzyjających warunkach (wilgotność



Rys. 8.7. Możliwość niszczenia układów elektronicznych przez ESD jeśli naładowany jest operator (a, b) lub naładowane są elementy (c, d) [8]

względna 20%, nylonowa wykładzina podłogowa) potencjał ten może przekraczać 10 kV (teoretycznie nawet do 25 kV).

Proces rozładowania jest bardzo gwałtowny i jest obserwowany w postaci iskry. Jest to właściwe wyładowanie elektrostatyczne, określane akronimem ESD (ang. *Electrostatic Discharge*). Kształt i parametry elektryczne impulsów ESD zależą od wielu czynników, między innymi od kształtu elektrody inicjującej impuls (może być to palec operatora). Energia impulsów dochodzi do wartości kilkuset miliardów, a czas – do kilkunastu milisekund. Wyładowania takie mogą prowadzić do przebieg międzyelektrodowych i trwałych uszkodzeń.

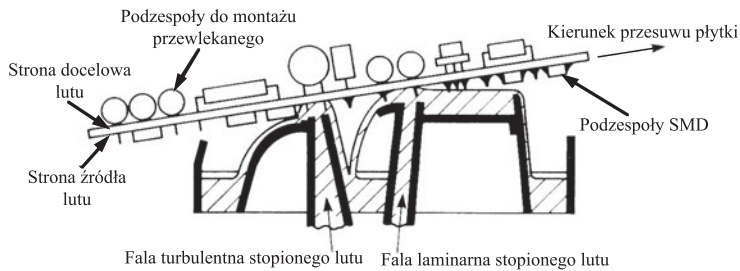


Rys. 8.8. Antystatyczne środowisko pracy [8]

Na rysunku 8.7 pokazano przykłady możliwości niszczenia układów scalonych wskutek wyładowań elektrostatycznych bądź przez naładowanego operatora (przykłady a, b), bądź też przez operatora lub uziemione podłoże w warunkach, gdy element ładuje się wskutek przesuwania w podajniku z izolacyjnego materiału (c, d). Zapobieganie destrukcyjnym skutkom ESD polega między innymi na konieczności pracy na antystatycznych stanowiskach naprawczych (rys. 8.8).

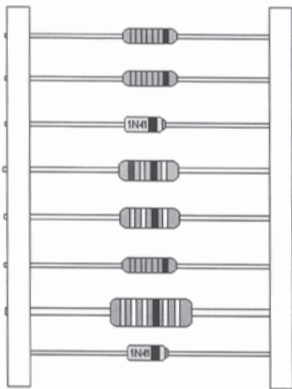
8.3. Lutowanie na fali

W zmechanizowanym procesie lutowania na fali wykorzystuje się stacjonarną falę stopionego lutu, która w sposób ciągły uzupełniana jest świeżym lutem pompowanym z dna zbiornika wanny lutowniczej. Płytkę drukowaną z zamocowanymi mechanicznie podzespołami jest przenoszona na transporterze kolejno nad strefą topnienia, strefą grzania wstępnego, a następnie w poprzek grzbietu fali stopionego lutu (strefa lutowania) – rys. 8.9.

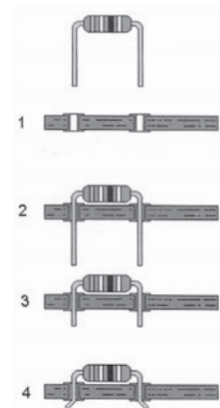


Rys. 8.9. Schemat procesu lutowania na podwójnej fali [18]

Czynnością poprzedzającą proces lutowania jest obsadzenie płytki elementami, zarówno przeznaczonymi do montażu przewlekanego, jak i do powierzchniowego. Pierwszym etapem montażu przewlekanego jest sekwencyjne uszeregowanie różnych elementów w zależności od kolejności montażu. Takie uszeregowanie może mieć postać taśmy, jak pokazano to na rys. 8.10. Automat pobiera kolejno elementy z takiej taśmy i wprowadza je w otwory płytki obwodu drukowanego. Sam proces automatycznego obsadzania ma kilka etapów (rys. 8.11); 1 – zagięcie końcówek, 2 – włożenie końcówek do otworów, 3 – obcięcie końcówek, 4 – ich zagięcie, co mocuje elementy mechanicznie.



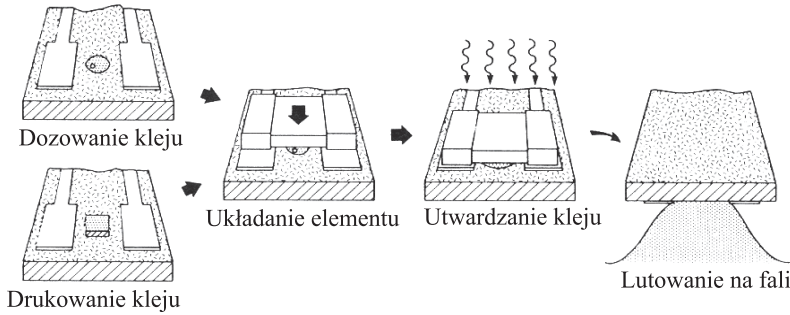
Rys. 8.10. Sekwencyjne uszeregowanie elementów do montażu przewlekanego [5]



Rys. 8.11. Etapy obsadzania PCB elementami do montażu przewlekanego [5]

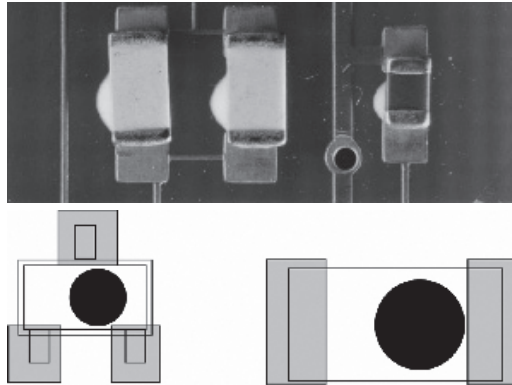
Podzespoły SMD muszą być przyklejone do płytki przed procesem lutowania. Operacja ta polega na (rys. 8.12):

- dozowaniu lub drukowaniu kleju strukturalnego,
- układaniu elementów dokładnie w wyznaczonych przez pola lutownicze miejscach,
- utwardzaniu kleju,
- odwróceniu płytki z elementami tak, aby elementy zostały zanurzone w ciekłym lutu. Przylutowane elementy SMD pokazano na rysunku 8.20.



Rys. 8.12. Etapy obsadzania PCB elementami do montażu powierzchniowego [4]

Klej jest dozowany automatycznie, przy czym powinien być on aplikowany centralnie pomiędzy polami lutowniczymi. Normy dopuszczają brak centryczności, a nawet kropla może dotykać pola kontaktowego, przy czym nie może być nałożona na metalizację pól (rys. 8.13).

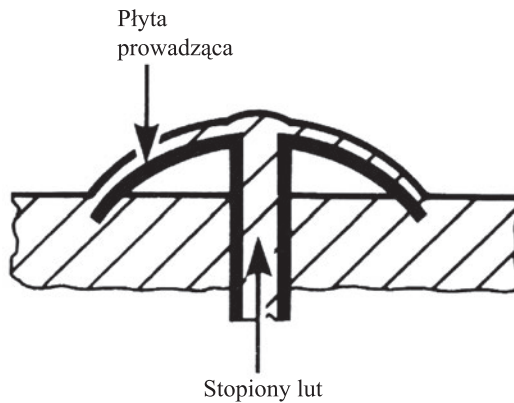


Rys. 8.13. Akceptowalne dozowanie kleju [24]

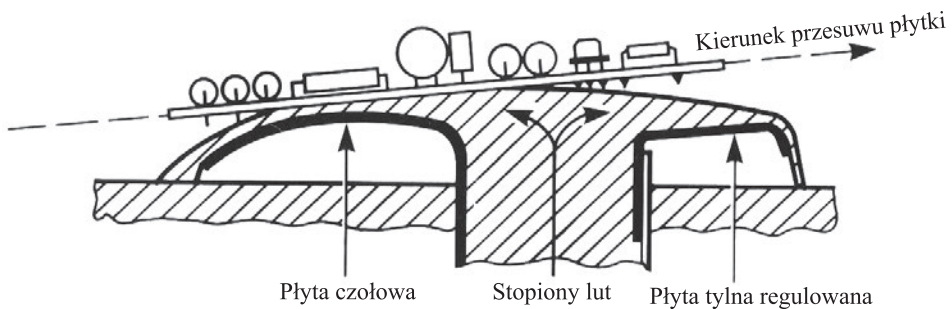
Czynnikami decydującymi o przebiegu procesu lutowania jest szerokość obszaru kontaktu między falą lutu i stroną płytki od strony źródła lutu oraz prędkość przenoszenia płytki. Transporter z umieszczoną na nim płytką jest zwykle prowadzony z niewielkim nachyleniem wynoszącym maksymalnie 7° . O jakości procesu decyduje także moduł formowania fali.

Klasyfikacja fali główna nazywana falą „T” jest wąską falą dwukierunkową z dwoma płytami prowadzącymi, po których lut spływa z obu stron dyszy i wraca z powrotem do zbiornika pompy (rys. 8.14). Obecnie najczęściej jako falę główną wykorzystuje się różne modyfikacje dwukierunkowej fali Lambda (rys. 8.15). W wyniku specyficznego wydłużonego kształtu fali przepływ lutu ulega przyspieszeniu w kierunku przeciwnym do ruchu płytki. Powstaje w ten sposób intensywne działanie przepłukiwania ułatwiające zwilżenie.

Z chwilą pojawienia się koncepcji montażu mieszanego, łączącego w jednym procesie lutowania na fali podzespoły do montażu przewlekane i podzespoły SMD, urządzenia



Rys. 8.14. Fala główna typu T [18]

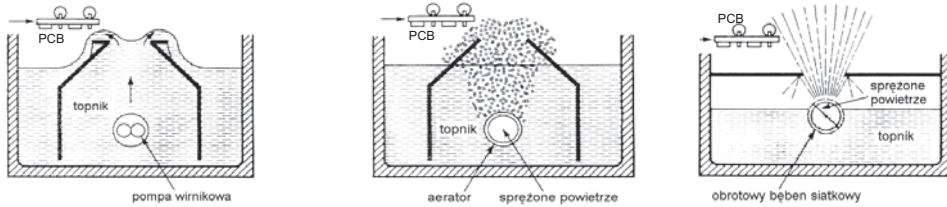


Rys. 8.15. Fala główna typu Lambda [18]

do lutowania na fali zostały wyposażone w umieszczone obok siebie dwie fale: turbulentną i laminarną (rys. 8.9). Fala turbulentna charakteryzuje się dużą dynamiką przepływu w kierunku pionowym i dzięki temu zapewnia doskonały dostęp lutu do wyprowadzeń/końcówek podzespołów SMD znajdujących się od strony źródła lutu, jak również doskonałą penetrację wąskich szczelin. Fala turbulentna nie jest zdolna do skutecznego usuwania nadmiaru lutu z łączonych powierzchni. To zadanie spełnia fala laminarna nazywana także falą główną. W fali laminarnej, w momencie wychodzenia płytki ze strefy stopionego lutu, prędkość przepływu lutu względem płytki jest minimalna. Stwarza to warunki pozwalające na usuwanie nadmiaru lutu z połączeń.

Przed procesem lutowania konieczne jest dozowanie topnika, czyli topnikowanie. Urządzenia do nanoszenia topnika mogą stanowić integralną część urządzenia do lutowania lub pracować jako indywidualne moduły ustawiane przed urządzeniem. Topniki są наносzone poprzez uformowanie fali, metodą pianową lub natryskiem (rys. 8.16). W urządzeniach z falą lub pianą ilość наносzonego topnika jest względnie stała, a zmiana tej ilości może być spowodowana tylko zmianą prędkości przesuwu transportera. Największe możliwości technologiczne ma system natryskowy, pozwala bowiem on na kontrolę ilości наносzonego topnika. Topnik jest natryskiwany w postaci minimalnych kropelek, których

strumień dociera w głąb otworów i w miejsca trudno dostępne, a dokładny system pozycjonowania natrysku pozwala na nanoszenie topnika w sposób selektywny, na wybrane obszary płytki lub palety z płytkami. Ponadto system natryskowy pozwala na różne kombinacje nanoszenia topników w jednej maszynie, takie jak natrysk dwóch różnych topników z dwóch różnych zbiorników zasilających, jednoczesny podwójny natrysk z jednego zbiornika zasilającego lub natrysk jednego topnika z dwóch zbiorników zasilających.

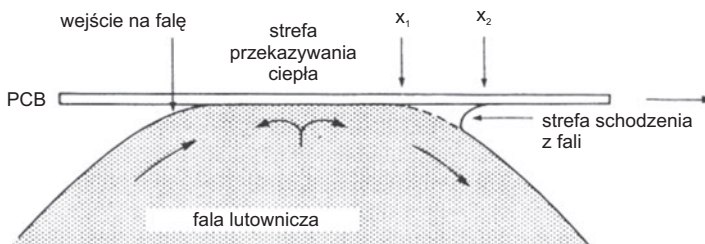


Rys. 8.16. Metody nanoszenia topnika: w formie fali, pianowo i natryskowo wg [4]

Przed wejściem na falę elementy są wstępnie nagrzewane. W strefie grzania wstępnego odbywa się proces odparowania rozpuszczalników i podgrzanie topnika, które przyspiesza reakcje chemiczne na powierzchniach przeznaczonych do lutowania i moment początku aktywacji topnika.

Podstawowe cele realizowane w strefie grzania wstępnego:

- Usunięcie rozpuszczalnika/-ów z topnika przed wprowadzeniem zespołu w strefę maksymalnej temperatury lutowania. Bez tego etapu może nastąpić gwałtowne odparowanie, któremu prawdopodobnie będzie towarzyszyć rozprysk kulek lutu. Szczególnie są na to podatne topniki wodne.
- Uzyskanie odpowiedniej lepkości topnika. Jeżeli lepkość jest zbyt mała, to topnik będzie przedwcześnie usuwany z płytki przez falę lutu. Może to być przyczyną złego zwilżenia.
- Zapewnienie zespołowi odpowiedniej temperatury, pozwalającej na przyspieszenie akcji aktywującej topnika.
- Zminimalizowanie udaru cieplnego, któremu podlega zespół lutowany, wchodząc w strefę lutowania.



Rys. 8.17. Oddziaływanie fali lutowniczej z PCB [4]

W strefie grzania wstępnego źródłem ciepła może być gorące powietrze unoszone konwekcyjnie lub w sposób wymuszony, albo promienniki bliskiej lub dalekiej podczerwieni.

Jak wcześniej wspomniano, podzespoły do montażu muszą być stabilnie zamontowane po to, aby uderzenie fali lutowniczej nie powodowało zmiany ich położenia. Dlatego też wyprowadzenia elementów do montażu przewlekanych są wprowadzane w metalizowane otwory płytek, a elementy SMD są przyklejone.

Oddziaływanie fali lutowniczej z płytką obwodu drukowanego (rys. 8.17) odbywa się w trzech wyraźnie zróżnicowanych etapach. Etap pierwszy (zwilżania) to moment wchodzenia zespołu na fałę, podczas którego powierzchnie przeznaczone do lutowania oczyszczają się w wyniku działania topnika. Następuje:

- parowanie resztek rozpuszczalnika,
- akumulacja gorącego topnika i ostateczne przygotowanie powierzchni płytki do lutowania,
- zmywanie produktów oczyszczania.

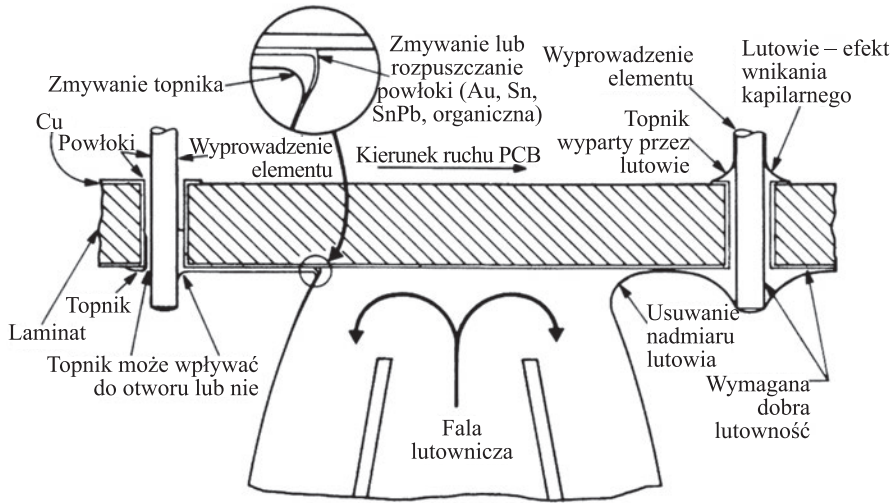
Proces ten powinien się zakończyć zanim płytka znajdzie się w obszarze środkowej części fali. W tym drugim etapie procesu lutowania nie powinny występować jakiegokolwiek przeszkody na drodze przepływu lutu. To etap przekazywania ciepła, w którym wszystkie powierzchnie lutowane znajdują się w bezpośrednim kontakcie ze stopionym lutem. Pozostała niewielka ilość topnika (główna część została wypłukana przez fałę lutu w poprzednim etapie) jest ciągnięta przez fałę i może jeszcze oddziaływać w tym obszarze. W chwili wychodzenia zespołu z drugiego etapu pozostałość topnika znajduje się tylko na powierzchniach niemetalicznych. Czas kontaktu zespołu ze stopionym lutem wynosi zwykle kilka sekund i jest ściśle związany z rodzajem stosowanego stopu, rodzajem płytki i wymaganiami stawianymi lutowanemu zespołowi. Dłuższy czas kontaktu będzie wymagany przy stosowaniu stopu bezołowiowego (w stosunku do wcześniej stosowanych stopów SnPb), płytek wielowarstwowych, oraz w wypadku konieczności pełnego zwilżenia metalizowanych otworów przelotowych, także na górnej powierzchni płytki. Ta powierzchnia (przeciwna do zwilżanej fałą lutowniczą) jest nazywana stroną docelową lutu.

Zjawiska zachodzące przy przejściu przez fałę pokazano na rys. 8.18. Przy lutowaniu elementów do montażu przewlekanych, poprzez zanurzenie w ciekłym lucie, wyprowadzenie nagrzewa się, a lut wnika w przestrzeń między ścianki otworu i wyprowadzenie (rys. 8.19). Elementy do montażu powierzchniowego zostają przylutowane, pokazano to na rys. 8.20.

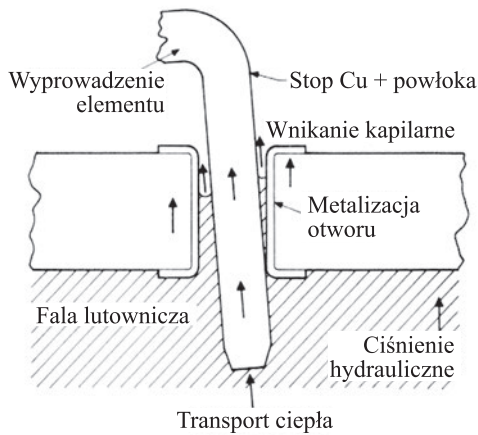
W trzecim etapie natępuje opuszczanie fali przez płytkę i wycofywanie się lutu z płytki. Zachodzą tu następujące zjawiska:

- tworzenie się złącza lutowanego (wraz z defektami),
- stopiony lut odrywa się od niezwilżonych powierzchni w punkcie X_1 (rys. 8.17), a od zwilżonych w punkcie X_2 (nawet 25 mm dalej),
- podczas przeskoku lutu pomiędzy tymi fragmentami powierzchni mogą się tworzyć mostki zwierające elementy i wolne kulki lutu.

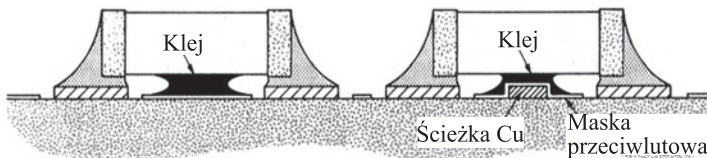
To bardzo newralgiczny obszar, który ma wpływ na powstawanie defektów decydujących o jakości lutowania. Zminimalizowanie tworzenia mostków można uzyskać, między innymi



Rys. 8.18. Zjawiska zachodzące w procesie lutowania (montaż przewlekany) wg [4]

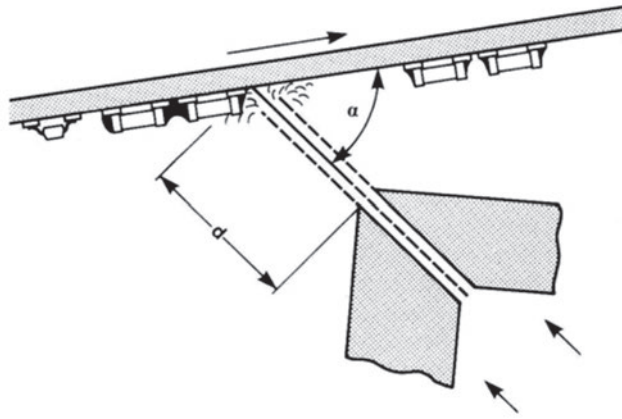


Rys. 8.19. Wnikanie ciekłego lutu w procesie lutowania (montaż przewlekany) [4]

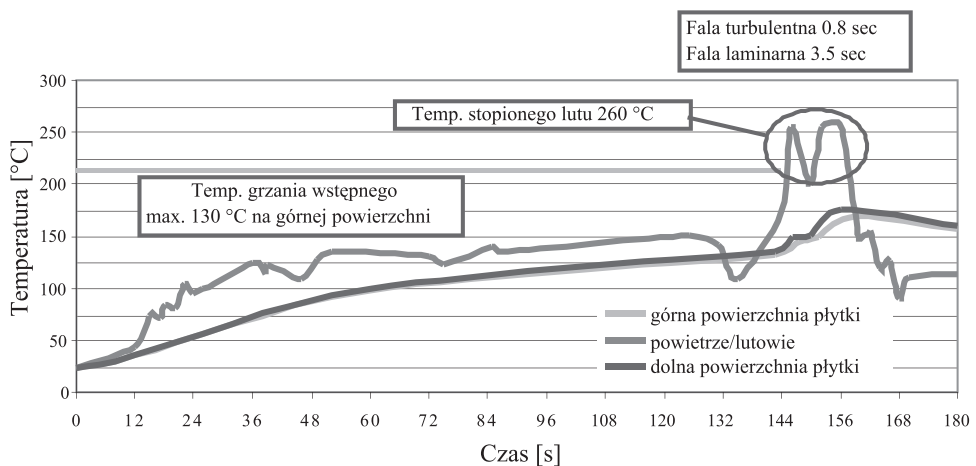


Rys. 8.20. Elementy SMD przylutowane przy zastosowaniu fali [4]

dzięki zapewnieniu łagodnego i gładkiego płynięcia fali w części wyjściowej, zmniejszenie prędkości transportera, dostarczenie oleju do fali, czy też nadmuchu gorącego powietrza (tzw. nóż powietrzny) w obszarze wyjścia w celu przerwania mostków, co pokazano na rys. 8.21.



Rys. 8.21. Działanie noża powietrznego [18]



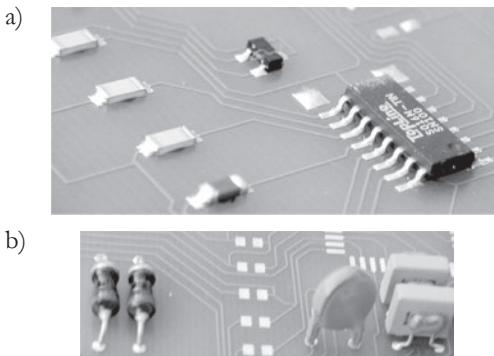
Rys. 8.22. Charakterystyka temperaturowo-czasowa lutowania bezolowiowego na podwójnej fali. Temperatury mierzone na górnej i dolnej stronie lutowanego zespołu oraz temperatury powietrza i stopionego lutu [18]

Na rysunku 8.22 przedstawiono szczegółowe charakterystyki czasowo-temperaturowe procesu lutowania bezolowiowego na fali. Pokazano przebieg temperatury powietrza w strefie grzania wstępnego i stopionego lutu w trakcie przekazywania ciepła, a także temperatury na powierzchniach płytki obwodu drukowanego od strony źródła lutu i na stronie docelowej lutu.

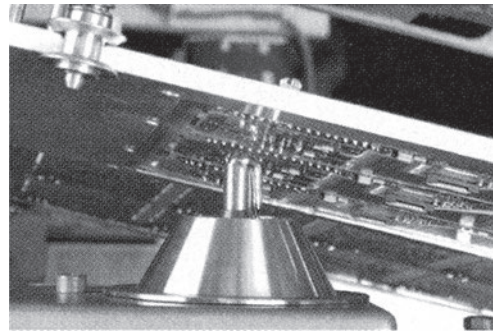
Do czynników decydujących o prawidłowym przebiegu procesu lutowania na fa-li należą:

- właściwy dobór topnika o odpowiedniej stabilności cieplnej;
- temperatura stopionego lutu zależna od rodzaju stopu;
- czas kontaktu lutowanego zespołu ze stopionym lutem zależny od zdolności stopu do zwilżania powierzchni lutowanych;
- sposób dodatkowego dostarczania ciepła – zespoły na grubych wielowarstwowych podłożach mogą wymagać dodatkowej strefy grzania od góry.

Przykład prawidłowych połączeń pokazano na rys. 8.23.



Rys. 8.23. Połączenia podzespołów SMD od strony źródła lutu (a) i podzespołów do montażu przewlekanego od strony przeciwnej (b) [18]

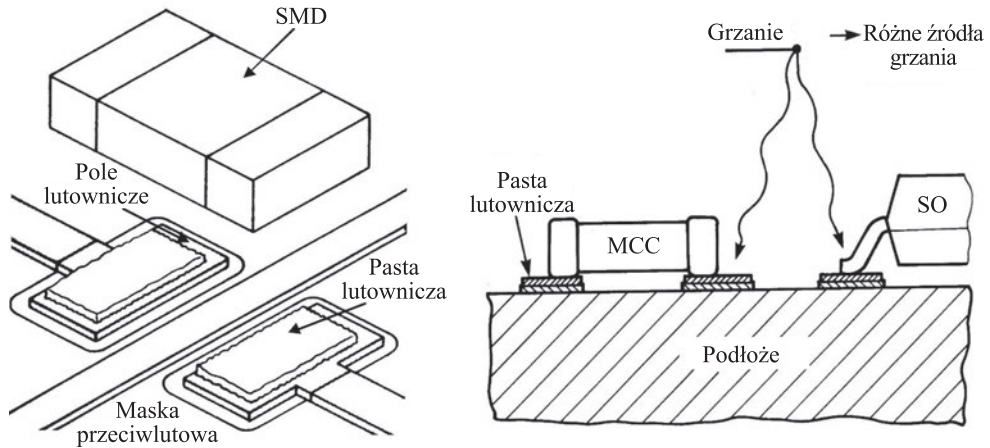


Rys. 8.24. Dysza do lutowania selektywnego [4]

Istnieje możliwość lutowania pojedynczych elementów, w czasie którego podzespół lub podzespoły do montażu przewlekanego są lutowane selektywnie od spodu płytki obwo-du drukowanego. Wymaga to wytworzenia minifali przez jedną samodzielnie pracują-cą dyszę. Ten sposób nazywany jest lutowaniem selektywnym przez przeciąganie lub lutowaniem falą selektywną. Najczęściej stosowane są dysze z falą lutu przelewającą się w jednym kierunku (rys. 8.24). W celu zapewnienia niezawodnego procesu dysza powin-na mieć wewnętrzną średnicę co najmniej 6 mm. Kierunek przepływu lutu jest okreś-łony, ale dysza może być montowana w różnych kierunkach, a przepływ lutu optymalizowany w zależności od aplikacji.

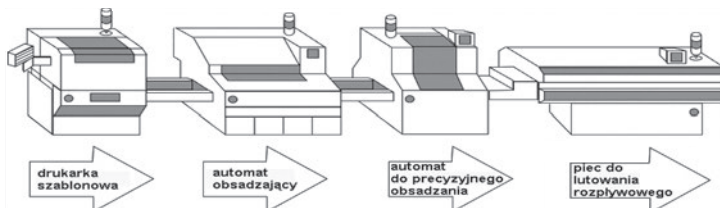
8.4. LUTOWANIE ROZPLYWOWE

Proces zmechanizowanego lutowania rozplywowego (rys. 8.25) polega na formowa-niu połączenia lutowanego w procesie topienia ziaren stopu bezołowiowego zawartych w paście lutowniczej, nałożonej najczęściej metodą druku przez szablono na pola lutow-nicze płytki obwo-du drukowanego. PCB z osadzonymi na paście lutowniczej podzespo-łami do montażu powierzchniowego przechodzi zwykle przez piec, w którym dostarcza-



Rys. 8.25. Zasada lutowania rozplywowego. Pasta lutownicza naniesiona na pola lutownicze oraz proces formowania połączenia lutowanego w wyniku dostarczenia ciepła do powierzchni lutowanych w celu doprowadzenia do koalescencji ziaren stopu zawartych w paście [18]

ne jest ciepło potrzebne do nagrzania obszarów przeznaczonych do lutowania, oczyszczenia powierzchni lutowanych przez topnik zawarty w paście oraz doprowadzenia pasty do temperatury lutowania (kilkadziesiąt stopni powyżej temperatury topnienia stopu lutowniczego). W momencie osiągnięcia tej temperatury ziarna stopu topią się i ulegają koalescencji, tworząc wypełnienie połączenia lutowanego. Typowy zestaw technologiczny pokazano na rys. 8.26.



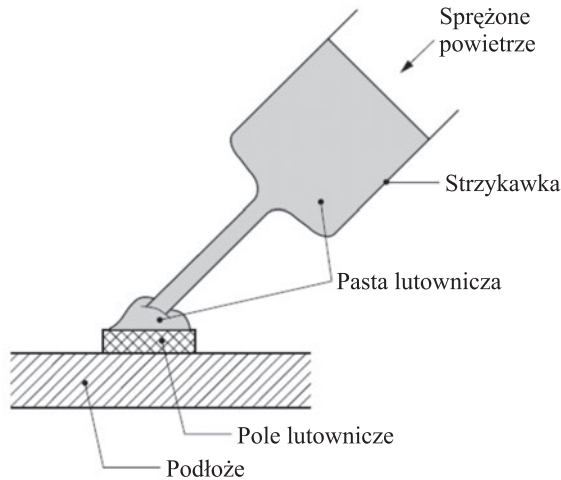
Rys. 8.26. Zestaw technologiczny do montażu powierzchniowego z lutowaniem rozplywowym [4]

Pierwszą istotną czynnością technologiczną jest nanoszenie pasty lutowniczej. Oczywiście odpowiedni wybór pasty lutowniczej jest jednym z czynników odpowiedzialnych za prawidłowy przebieg procesu lutowania. Pasta lutownicza, nawet najlepszej jakości, jest materiałem złożonym i może wykazywać zmiany właściwości w czasie magazynowania i wykorzystywania w procesie produkcyjnym. Ze względu na związane z tym wady drukowania i lutowania należy zwrócić uwagę na następujące negatywne czynniki:

- stosowanie pasty po okresie gwarancji (w miarę starzenia się pasty ziarna stopu ulegają utlenianiu, które powoduje narastanie warstwy tlenków),

- zmiany reologiczne pasty (z powodu dużych naprężeń powstających w paście w procesie drukowania lepkość pasty, jak i jej właściwości reologiczne mogą ulegać zmianie),
- oddzielanie się rozpuszczalnika,
- absorpcja wilgoci,
- rozwarstwianie pasty.

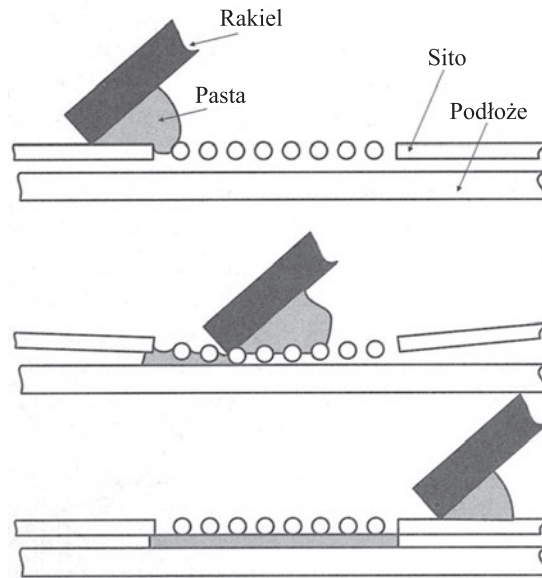
Metody nakładania pasty lutowniczej na obszary mozaiki pól lutowniczych do montażu powierzchniowego obejmują: drukowanie przez sito (stosunkowo rzadko stosowana) lub szablono albo metodą dozowania. Dozowanie pasty strzykawką (rys. 8.27), zwykle za pomocą sprężonego powietrza o kontrolowanym czasie impulsu, jest stosowane w produkcji jednostkowej lub małoseryjnej.



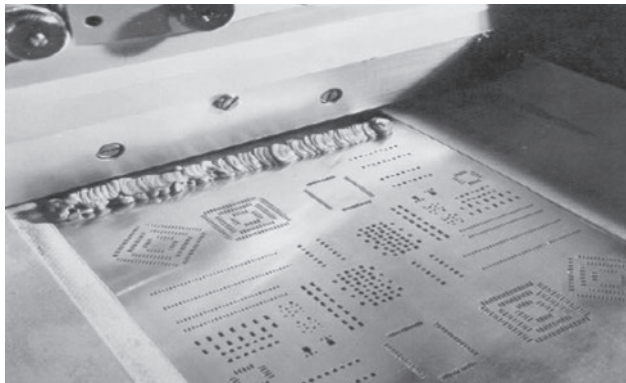
Rys. 8.27. Dozowanie pasty lutowniczej wg [25]

Przy drukowaniu przez sito w oknach sit umieszczona jest siatka o odpowiedniej liczbie otworów na cal lub centymetr kwadratowy dobranych tak, aby w trakcie nakładania pasta opływała druty siatki i osadzała się na drukowanej powierzchni (rys. 8.28). W drukowaniu przez szablono w jego oknach natomiast nie ma przeszkód na drodze płynięcia pasty. Nanoszenie pasty przez szablono (drukowanie kontaktowe) jest procesem dominującym w technologii montażu powierzchniowego (rys. 8.29). Jest to jedyny sposób, który pozwala na powiązanie wymagania „krótkiego czasu cyklu pracy” zarówno z jakością połączenia lutowanego, jak i z jakością oraz powtarzalnością nałożonej warstwy, niezależnie od wielkości pola lutowniczego i rastra mozaiki pól lutowniczych.

Podstawowym celem procesu drukowania przez szablono jest umieszczenie właściwej ilości pasty w odpowiednim miejscu w sposób powtarzalny. Proces drukowania pasty jest wzajemnie złożonym oddziaływaniem pasty, szablono i rakli. Do dodatkowych czynników, które mogą zakłócać prawidłowe nałożenie pasty należy rodzaj powłoki lutowanej płytki obwodu drukowanego oraz parametry drukowania, takie jak prędkość przesuwu rakli, nacisk i kąt ustawienia rakli.

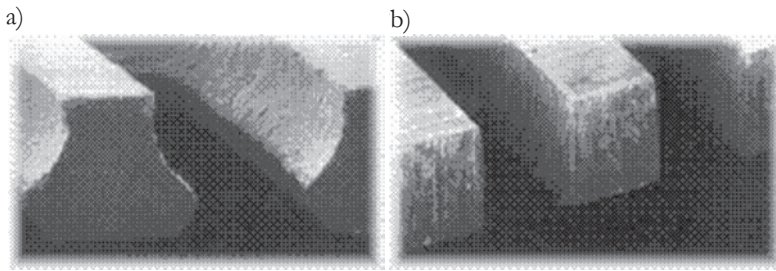


Rys. 8.28. Nanoszenie pasty przez sito [16]

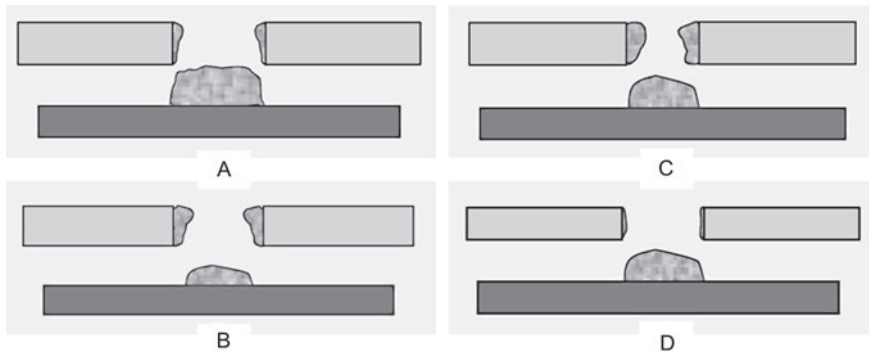


Rys. 8.29. Proces drukowania szablónowego [9]

Szablony mogą być polimerowe, ale częściej stosuje się wykonane z blachy (głównie ze stali nierdzewnej). Grubość blachy jest zależna od tzw. rastra (wielkości otworów) i wynosi od 100 do 200 μm . Mozaika otworów w szablonie jest dostosowana do mozaiki pól lutowniczych płytki obwodu drukowanego, ale, aby mieć pewność, że pasta będzie nanoszona wyłącznie na pola lutownicze, otwory są ok. 10% mniejsze od pól. Otwory wykonuje się metodą trawienia lub wycinania laserowego. Wycinanie laserowe stosuje się dla małych rastrów. Charakteryzują się brakiem typowego dla szablónów wytrawianych nieckowatego kształtu ścian, nawet dla szablónów wykonywanych ze stosunkowo grubej blachy (rys. 8.30). Proste ściany wyciętego laserem otworu pozwalają na łatwe i całkowite oderwanie się pasty lutowniczej od podnoszonego szablónu.



Rys. 8.30. Profile ścian otworów szablonów trawionych (a) i wycinanych laserem (b)



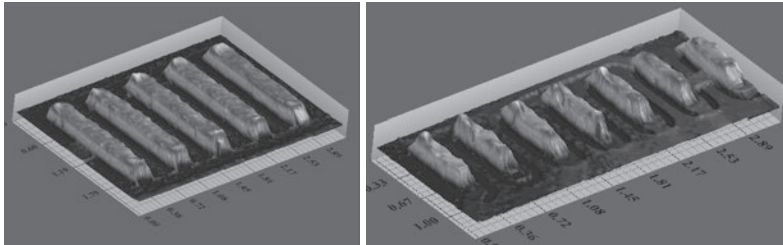
Rys. 8.31. Efektywność transferu pasty w zależności od wielkości okna i grubości szablonu [18]

Jakość wykonania szablonu i prawidłowość nadruku past mogą być badane i kontrolowane za pomocą pomiaru efektywności transferu pasty. Efektywnością transferu nazywany jest stosunek objętości naniesionej pasty do objętości okna szablonu. Wartość tego parametru można zamieniać, wprowadzając zmiany w grubości szablonu i wielkości okna. Na rysunku 8.31 zilustrowano wpływ zmniejszenia wymiaru okna i grubości szablonu na objętości naniesionej pasty, przy czym parametry geometryczne szablonu i efektywność transferu podano w tabeli 8.1.

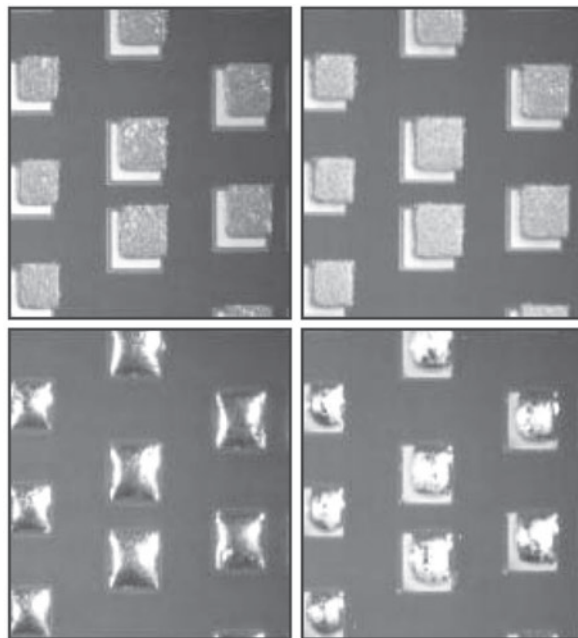
Tabela 8.1. Efektywność transferu pasty w zależności od wielkości okna i grubości szablonu

Dane charakterystyczne	A	B	C	D
Grubość szablonu	125 μm	125 μm	125 μm	100 μm
Średnica okna	300 μm	275 μm	250 μm	250 μm
Współczynnik kształtu	0,6	0,55	0,5	0,63
Efektywność przenoszenia	42%	31%	22,3%	49,4%
Objętość okna	0,0088 mm^3	0,0074 mm^3	0,0061 mm^3	0,005 mm^3
Objętość naniesionej pasty	0,0036 mm^3	0,0023 mm^3	0,0013 mm^3	0,0024 mm^3

Po wyborze wielkości okna bezwzględnie należy ocenić prawidłowość nanoszenia pasty oraz (po procesie termicznym) – zwilżenie pól lutowniczych. Przykład prawidłowy i nieodpowiedni nadrukowania pasty pokazano na rys. 8.32, a na rys. 8.33 – niepełne zwilżenie pól lutowniczych.

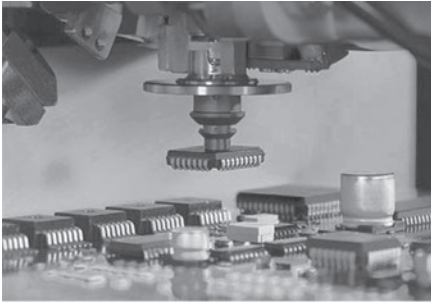


Rys. 8.32. Trójwymiarowy obraz warstwy pasty nadrukowanej w sposób prawidłowy i nieodpowiedni [18]

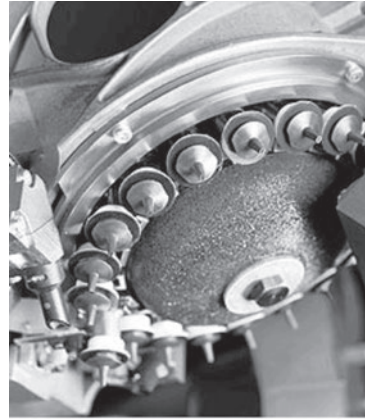


Rys. 8.33. Nadrukowana pasta i zwilżenie pól lutowniczych pastą SnPb (po lewej stronie) i pastą bezołowiową (po prawej stronie) [18]

Kolejnym etapem technologii jest układanie elementów SMD. W produkcji seryjnej proces układania odbywa się w specjalnych urządzeniach do obsadzania elementów (ang. *pick & place*). Zawierają one głowicę (rys. 8.34), która z odpowiednich podajników pobiera elementy i osadza je na polach lutowniczych płytki (pokrytych pastą lutowniczą).



Rys. 8.34. Automatyczne osadzanie elementów do montażu powierzchniowego [4]

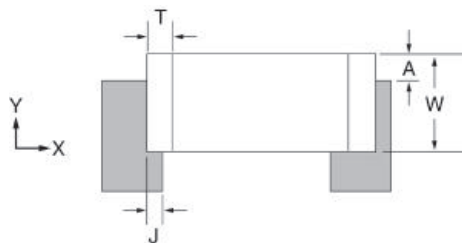
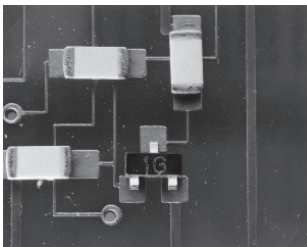


Rys. 8.35. Głowica urządzenia *pick & place* do układania wielu elementów

Zazwyczaj, w celu uzyskania dużej wydajności montażu, urządzenie zawiera wielopozycyjną głowicę lub wiele głowic pobierających dużą liczbę elementów (rys. 8.35).

Istotnym problem jest dokładność posadowienia elementów względem pól lutowniczych. Zakłada się, że podzespoły mogą być przesunięte względem osi X lub Y lub skrócone, przy czym normy lub inne wymagania określają, jak duże może być odstępstwo od stanu idealnego. Na przykład dla montowanych powierzchniowo podzespołów typu chip z wyprowadzeniami metalowymi, dla „wyrobów elektronicznych ogólnego przeznaczenia, w tym wyrobów ogólnego użytku, niektórych komputerów i komputerowych urządzeń peryferyjnych oraz sprzętu wykorzystywanego w zastosowaniach, w których głównym wymaganiem jest działanie zmontowanego zespołu” norma przewiduje, że akceptowane są następujące warunki osadzania (rys. 8.36):

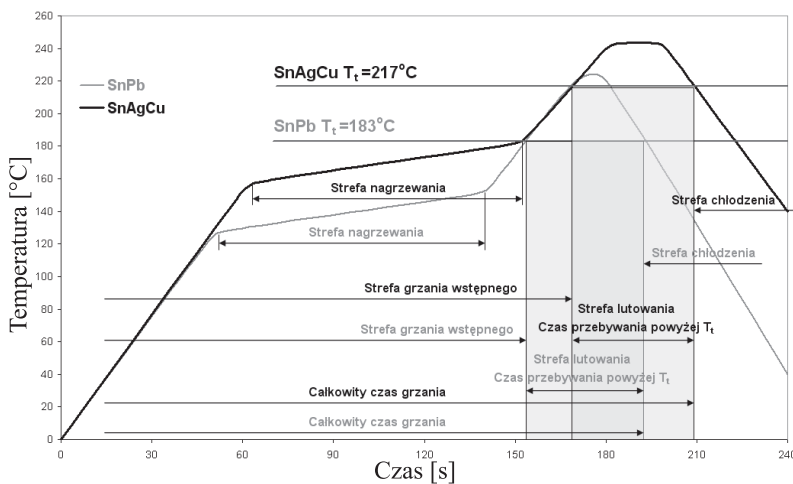
- oś X – brak nawisu od strony końca,
- nałożenie J wyprowadzenia/pola jest równe $2/3 T$ lub większe,
- oś Y – nawis boczny A wyprowadzenia nie przekracza $1/2 W$.



Rys. 8.36. Kryteria akceptacji osadzania elementów SMD typu chip [24]

Lutowanie rozpliwowe wymaga dostarczenia ciepła. Prawidłowe zwilżenie powierzchni lutowanych na całej płytce oraz zminimalizowanie różnic temperatury w celu zabezpieczenia małych lub bardziej wrażliwych podzespołów przed uszkodzeniem, sta-

nowi olbrzymie wyzwanie, zwłaszcza gdy lutuje się duże płytki z gęsto upakowanymi podzespołami o zróżnicowanych rozmiarach. Określa się tzw. okno procesowe, które od strony minimalnych temperatur ograniczone jest temperaturą nieznacznie wyższą od temperatury topnienia lutu, natomiast od strony maksymalnych temperatur – wrażliwością elementów. Zbyt wysoka temperatura lutowania wprowadza bowiem ryzyko uszkodzenia podzespołów i odkształcania montowanych płytek. O ile przy wcześniej stosowanych stopach eutektycznych SnPb, okno to wynosiło 30–40 °C, o tyle przy stopach bezołowionych, ze względu na wyższą ich temperaturę topnienia, okno procesowe zmniejszyło się do 15–20 °C. Typowe charakterystyki temperaturowe procesu lutowania rozpliwowego z zaznaczeniem temperatur topnienia stopów i maksymalnej temperatury wynikającej z przyjętego okna procesowego pokazano na rys. 8.37.



Rys. 8.37. Charakterystyka temperaturowo-czasowa procesu lutowania rozpliwowego z profilem w strefie grzania wstępnego z przecięciem w postaci siodła [18]

W przebiegu charakterystyk temperaturowych można wyodrębnić kilka charakterystycznych fragmentów, które spełniają istotne funkcje w procesie lutowania. Maksymalna wartość nachylenia pierwszego stromego odcinka nie powinna przekraczać od 2 °C/s do 3 °C/s aż do osiągnięcia temperatury 120–140 °C. Jeżeli krzywa wznosi się zbyt szybko, może nastąpić gwałtowny rozprysk pasty będący źródłem wady lutowania w postaci kulek lutu rozrzuconych po powierzchni płytki. Płaski odcinek w postaci siodła na krzywej grzania wstępnego (strefa nagrzewania) odpowiada fazie wyrównywania temperatury wszystkich elementów zespołów o dużej masie cieplnej. Czas przebywania płytki w tym obszarze wynosi najczęściej od 60 s do 120 s w temperaturze 120–180 °C. Obszar ten jest także istotny ze względu na pastę lutowniczą, ponieważ stanowi strefę aktywacji topnika. Jeżeli temperatura jest zbyt wysoka w tym obszarze, to istnieje ryzyko rozprysku kulek

lutu na powierzchni płytki spowodowane zarówno zbyt gwałtownym odparowaniem rozpuszczalników, jak i nadmiernym utlenieniem ziaren stopu w paście.

W celu zmniejszenia ryzyka utraty aktywności topnika szybkość wzrostu temperatury w obszarze między końcem siódła a strefą maksymalnej temperatury lutowania nie powinna być większa niż 3 °C/s.

Aby uzyskać dobre zwilżenie i właściwej jakości pozostałości topnika po lutowaniu, czas przebywania płytki powyżej temperatury topnienia stopu powinien być dłuższy niż 30 s, ale nie powinien przekraczać 90 s, aby nie dopuścić do zwęglenia pozostałości topnika i ograniczyć grubość tworzących się związków międzymetalicznych w połączeniu lutowanym.

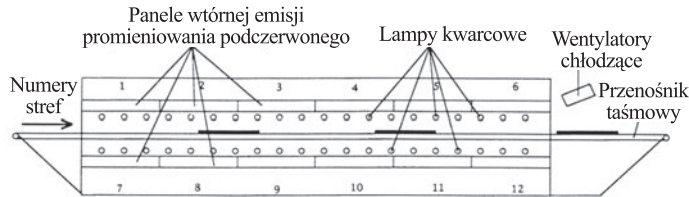
Do lutowania zwykle zaleca się stosowanie temperatury poniżej 245 °C ze względu na możliwość uszkodzenia podzespołów lub płytek w temperaturach wyższych. Zamiast wyraźnie zaznaczonego gwałtownego wzrostu i niemal natychmiastowego obniżania temperatury lutowania korzystniejsze jest uzyskanie krzywej lutowania w postaci długiego i stosunkowo płaskiego odcinka. Do tego celu najlepiej nadaje się piec wyposażony w dwie strefy lutowania, w którym w pierwszej strefie lutowania można stosować temperaturę nieznacznie wyższą pozwalającą na szybsze nagrzanie elementów trudnych. Zanim jednak wystąpiłoby przegrzanie małych elementów, zespół powinien się znaleźć w drugiej strefie lutowania o niższej temperaturze.

Znaczenie ma także szybkość chłodzenia. Zalecane jest szybkie przejście stopu ze stanu ciekłego do stanu stałego, ale nachylenie krzywej chłodzenia nie powinno nigdy przekraczać 2,5 °C/s. Im szybsze chłodzenie, tym łatwiej tworzy się struktura drobnokrystaliczna, ale także im szybsze chłodzenie, tym większe ryzyko pęknięcia podzespołów wrażliwych na szoki cieplne. Dlatego, zwłaszcza w lutowaniu bezołowiowym, temperatura w strefie chłodzenia powinna podlegać dokładnej kontroli, takiej samej jaką stosuje się w strefach grzania. Warunki w strefie chłodzenia wpływają na:

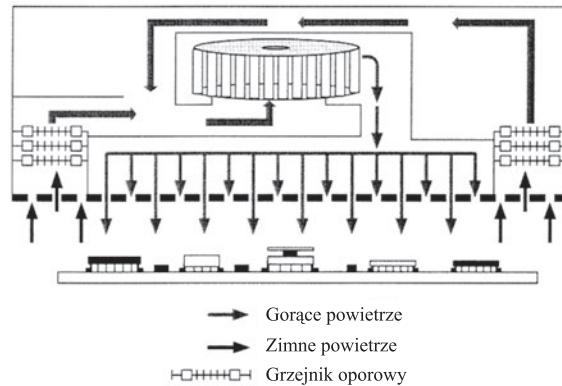
- czas przebywania powyżej temperatury topnienia stopu;
- temperaturę płytki w momencie wyjścia;
- formowanie się związków międzymetalicznych;
- mikrostrukturę połączenia lutowanego;
- wytrzymałość połączenia lutowanego na ścinanie;
- występowanie uszkodzeń w materiałach i podzespołach;
- naprężenia pozostające w połączeniu lutowanym.

Proces lutowania odbywa się w urządzeniach (piecach), w których płytki nagrzewane są w podczerwieni, w warunkach konwekcji naturalnej lub wymuszonej, a także w parach nasyconych. Piece do grzania w podczerwieni lub konwekcyjne mają zwykle tunelową komorę (piece tunelowe) z wieloma strefami grzejnymi, w której płytki są przenoszone transporterem. Schemat pieca tunelowego pokazano na rys. 8.38. Źródłem ciepła mogą być lampy kwarcowe, otwarte grzejniki oporowe lub inne promienniki podczerwieni.

Na potrzeby produkcji jednostkowej lub do celów laboratoryjnych mogą być stosowane konwekcyjne piece komorowe. Piece te są wyposażone w systemy programowania temperatury i czasu. Pozwala to na sekwencyjne (w czasie) ustawianie temperatury, tak



Rys. 8.38. Piec tunelowy do lutowania rozpliwowego [4]

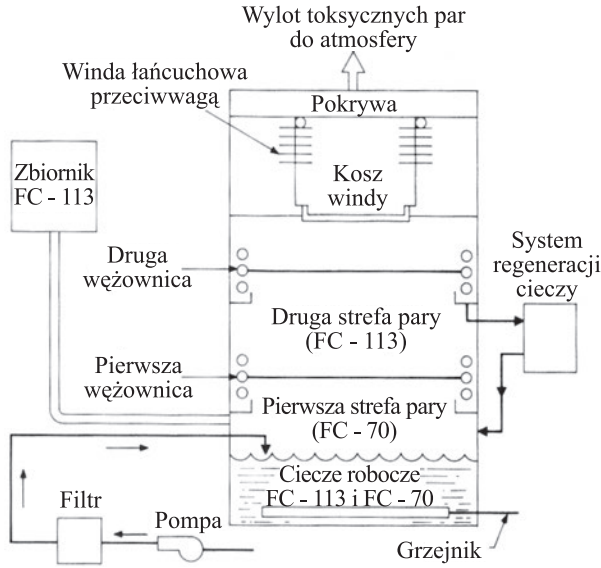


Rys. 8.39. Obieg powietrza w piecu komorowym [4]

aby otrzymać przebieg podobny do przedstawionego na rys. 8.37. Obieg powietrza w takim piecu może wyglądać, tak jak pokazano na rys. 8.39.

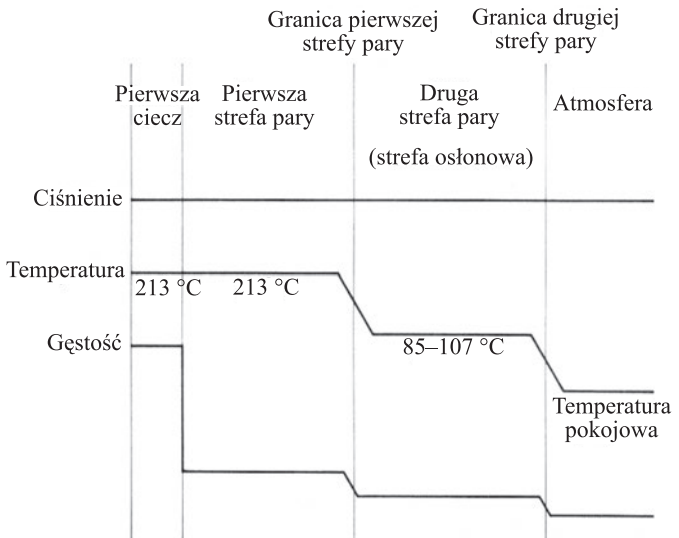
Azot w piecach do lutowania rozpliwowego jest stosowany do usunięcia tlenu zawartego w powietrzu. Zwykle stosuje się do tego azot o czystości 99,999%. Stosowanie azotu oddziałuje na dwa czynniki decydujące o jakości lutowania: zmniejsza napięcie powierzchniowe stopu bezołowiowego i ogranicza podatność na utlenianie powierzchni przeznaczonych do lutowania. Atmosfera azotu w piecu jest najbardziej potrzebna w końcowej części strefy grzania wstępnego i w strefach lutowania, w których temperatury są wysokie i podatność na utlenianie jest duża.

Możliwe jest też nagrzewanie wskutek kondensacji (skraplania) na powierzchniach ogrzewanych pary nasyconej. Lutowanie w fazie gazowej, znane również jako lutowanie kondensacyjne w parach nasyconych (ang: *Vapour Phase Soldering*, VPS), wykorzystuje do podgrzania płytki energię cieplną par uwolnioną podczas kontaktu z zimną płytką obwodu drukowanego. Para wytwarzana jest przez podgrzanie cieczy o dużej gęstości, która ma stały punkt wrzenia. Kondensacja pary trwa dopóty, dopóki płytka nie osiągnie temperatury pary. Ze względu na dużą gęstość pary, ciekły film wypiera tlen z powierzchni płytki. W efekcie proces podgrzewania i lutowania zachodzi w środowisku pozbawionym tlenu. Przekazywana ilość ciepła jest liniowa w stosunku do dostarczonej energii cieplnej. Po wyjęciu płytek z obszaru grzania w ciągu kilku sekund następuje odparowanie ciekłego filmu z modułów, bez osadu, gdyż ciecz jest obojętna. System wykorzystujący nagrze-



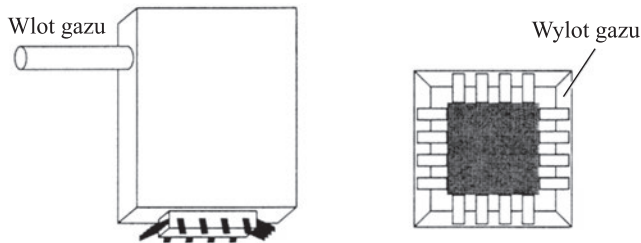
Rys. 8.40. Schemat pieca do lutowania w parach nasyconych [4]

wanie w parach nasyconych pokazano na rys. 8.40. Płytki wkłada się do kosza windy, która z określoną prędkością przemieszcza się najpierw do drugiej strefy pary, a następnie do pierwszej strefy pary. Te strefy wytworzone są przez odpowiednie ciecze o zróżnicowanej gęstości, których temperatura kondensacji determinuje temperaturę nagrzewania zanurzanych elementów. Temperaturę dla cieczy FC-113 (trójchlorotrójfluoroetan) i FC-70 (czterofluorotrójaminyloamina) pokazano na rys. 8.41.

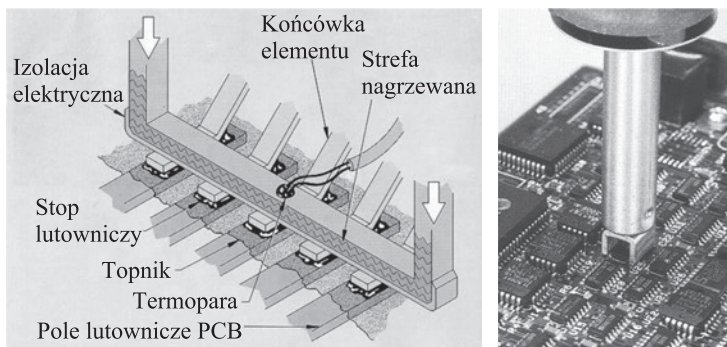


Rys. 8.41. Temperatury kondensacji cieczy [4]

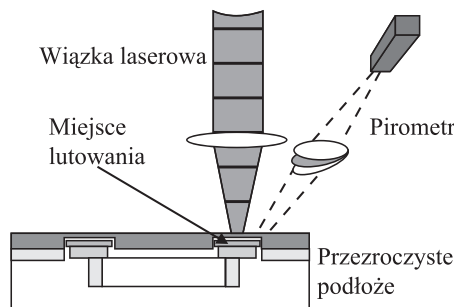
Innym źródłem ciepła w lutowaniu rozpliwowym może być gorące powietrze selektywnie dostarczane do lutowanych obszarów. Jak widać na rys. 8.42, dysza wylotowa jest tak skonstruowana, że może nagrzewać wyprowadzenia elementu typu QFP (lub PLCC) i pola lutownicze bez obawy znacznego podniesienia temperatury struktury półprzewodnikowej.



Rys. 8.42. Dysza do selektywnego nagrzewania strumieniem gorącego powietrza [4]



Rys. 8.43. Zasada kontaktowego nagrzewania rzędu wyprowadzeń. Obok wygląd głowicy kontaktowego lutowania pojedynczego elementu wg [9]



Rys. 8.44. Przykład użycia wiązki laserowej do lutowania rozpliwowego wg [26]

Zespoły wyprowadzeń można także nagrzewać kontaktowo gorącą termodą. Element, zwykle metalowy, nagrzewany jest oporowo i przykładany do wyprowadzeń, które mają być łączone, a ciepło przekazywane przez te wyprowadzenia prowadzi do stopienia luty. Kształt metalowej termody dostosowany jest do obudowy elementu, tak aby przy jednorazowym kontakcie można było wlutować bądź wylutować pojedynczy element. Przykład pokazano na rys. 8.43.

Do selektywnego nagrzewania można stosować wiązkę laserową. Odchylenie wiązki na pola lutownicze może powodować, że proces lutowania będzie następował wyłącznie w wybranych miejscach. Nie należy się więc spodziewać, że ta technologia będzie stosowana w produkcji seryjnej. Może jednak znaleźć zastosowanie w procesach nietypowych. Na rysunku 8.44 pokazano nagrzewanie pola lutowniczego od strony podłoża, a nie od strony elementu SMD. Jest to możliwe, jeśli podłożem jest materat przezroczysty i światło bez straty przechodzi przez ten materat, nagrzewając pole kontaktowe.

9. WADY POŁĄCZEŃ Lutowanych

Prawidłowo zwilżane powierzchnie i właściwe kształty połączeń lutowanych są efektem lutowania odpowiednio dobranych materiałów i zastosowanych technologii. Ilustruje to rys. 9.1. Jakość połączeń lutowanych zależy, między innymi od:

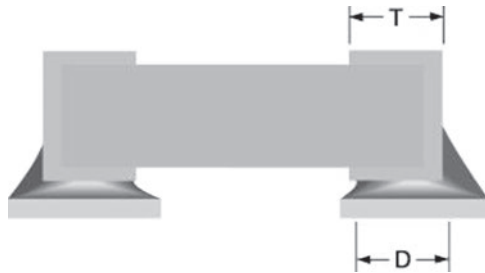
- zwilżalności lutowanych powierzchni,
- aktywności topnika, adekwatnie do lutowanych materiałów i stopu lutowniczego,
- rodzaju stopu lutowniczego i pasty lutowniczej,
- prawidłowości nałożenia pasty lutowniczej na pola kontaktowe,
- prawidłowości obsadzenia elementów,
- profilu temperaturowego i/lub kształtu fali lutowniczej,
- innych parametrów procesu technologicznego.



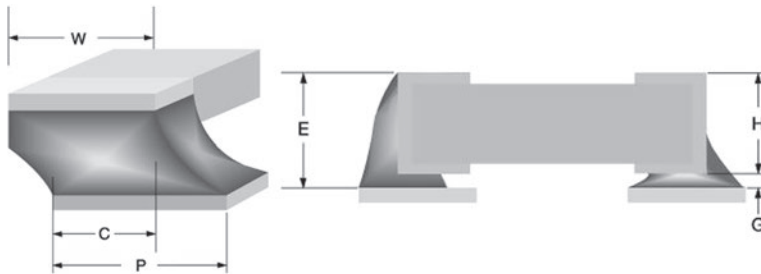
Rys. 9.1. Przykłady prawidłowo wykonanych połączeń lutowanych wg [9]

Na skutek braku pełnej powtarzalności w procesach automatycznego dozowania pasty lutowniczej i obsadzania elementów, a także w wyniku wad materiałowych i niedokładności procesu lutowania, należy spodziewać się odstępstw od podanych na rys. 9.1 prawidłowych kształtów złączy. Nie musi to jednak oznaczać, że połączenie nie spełnia swojej funkcji. Normy lub inne przepisy przedstawiają docelowe wypełnienie lutem, ale także wypełnienie akceptowalne dla określonego poziomu zastosowania sprzętu elektronicznego. Jako przykład, zaczerpnięty z normy „Wymagania dotyczące jakości wykonania zespołów elektronicznych lutowanych; część 2: Zespoły wykonywane techniką montażu powierzchniowego” [24], na rys. 9.2 pokazano docelowe ustawienie i wypełnienie lutem dla montażu powierzchniowego elementów typu chip. Rysunkowi towarzyszy opis: „Korpus podzespołu osadzony centralnie na polach względem obu kierunków: długości

i szerokości. Strona boczna wyprowadzenia znajduje się całkowicie na polu. Wypełnienie wklęsłe od strony końca ma wysokość $G + 3/4 H$ (opis na rys. 9.3), zwilżenie na całej szerokości powierzchni końca i rozciąga się w kierunku zewnętrznym na owo pole o $3/4 W$ (opis na rys. 9.3) poza wyprowadzenie. Wysokość wypełnienia bocznego jest równa minimum $1/2 H$ na całej długości T . Pole całkowicie zwilżone.” Z kolei na rysunku 9.3 przedstawiono akceptowalne ustawienie i wypełnienie lutem dla „wyrobów elektronicznych do specjalnych zastosowań, w tym urządzeń telekomunikacyjnych i profesjonalnych urządzeń biurowych.” Dla akceptowalnego połączenia „wysokość wypełnienia od strony końca jest większa niż $G + 1/4 H$ lub $G + 0,5 \text{ mm}$, w zależności, która wartość jest większa. Wysokość wypełnienia bocznego jest większa niż $1/2 T$. Szerokość połączenia końca C jest większa niż $1/2 W$. Brak lutu na korpusie poza obszarami wyprowadzeń.”



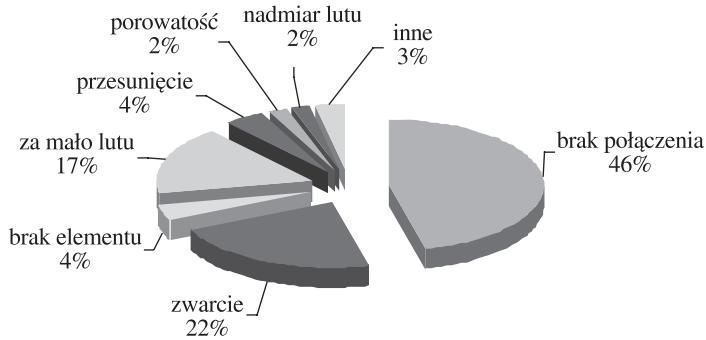
Rys. 9.2. Docelowe ustawienie i wypełnienie lutem [24]



Rys. 9.3. Akceptowalne ustawienie i wypełnienie lutem [24]

Nie zawsze są spełnione warunki akceptowalne dla danej grupy wyrobów. Dlatego proces technologiczny nie w każdym wypadku prowadzi do otrzymania bezwadliwych spoin. Wadliwe połączenia lutowane mogą być spowodowane nieprawidłowym przebiegiem procesu lutowania, niewłaściwymi materiałami, lub brakiem nadzorowania procesu. Typowe wady połączeń lutowanych to:

- brak połączenia,
- niezwilżenia i dowilżenia,



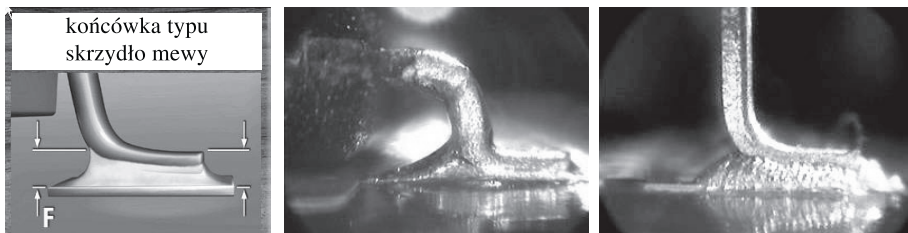
Rys. 9.4. Typowe wady w połączeniach lutowanych (na podstawie oceny ponad miliona wad) wg [4]

- niewystarczająca ilość lutu w połączeniu (dotyczy końcówek podzespołów do montażu przewlekanego),
- efekt cieniowania (brak połączenia lutowanego, dotyczy podzespołów SMD),
- obecność sopli lutu na polach i powierzchniach wyprowadzeń,
- nadmierna liczba mostków lutu,
- obecność kulek lutu na powierzchni płytki,
- nadmiarowe sferyczne wypełnienie lutem z jednej strony połączenia lutowanego (dotyczy podzespołów SMD),
- powstawanie pustych przestrzeni w połączeniach lutowanych (porowatość),
- część lutu połączenia oderwana od pola lutowniczego lub razem z polem oderwana od powierzchni płytki (dotyczy podzespołów do montażu przewlekanego);
- mostki w postaci włosowatych kryształów.

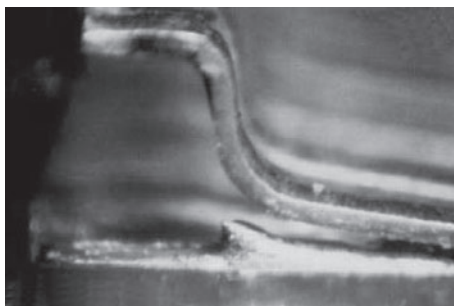
Proporcje występowania poszczególnych typów wad zilustrowano na rysunku 9.4.

9.1. NIEZWILŻANIE

Akceptowane połączenie lutowane powinno wykazywać oznaki zwilżenia lutu i przylegania, gdy łączy się z lutowaną powierzchnią, tworząc kąt styczności 90° lub mniejszy.



Rys. 9.5. Przykład dobrego zwilżenia (lewy i środkowy) i złego zwilżenia (prawy) końcówek układów scalonych od strony piętki [18]



Rys. 9.6. Pęknięte złącze lutowane [4]

Niezwilżenie jest widoczne w postaci kulek lutu utworzonych na powierzchniach łączonych, a kąt zwilżania jest duży. W akceptowanym połączeniu lutowanym powinno być widoczne gładkie przejście od pola lutowniczego do powierzchni połączenia lub końcówki podzespołu. Na rysunku 9.5 przedstawiono przykład bezołowiowego połączenia lutowanego końcówek układu scalonego z dobrym i nieodpowiednim zwilżeniem fragmentu doprowadzenia skierowanego prostopadłe do powierzchni pola kontaktowego.

Zbyt słabe zwilżanie przy obecności silnych naprężeń może prowadzić do pęknięcia złącza lutowanego (rys. 9.6).

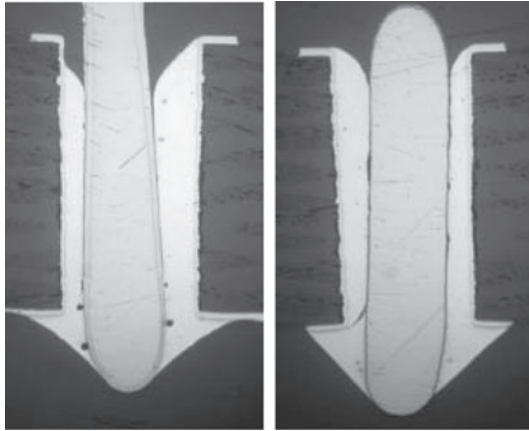
9.2. WADY Lutowania w MONTAŻU PRZEWLEKANYM

Na rysunku 9.7. przedstawiono zglądy metalograficzne połączeń końcówek podzespołów do montażu przewlekane z niedoborem lutu w połączeniu. Brak pełnego wypełnienia lutem może być spowodowany wieloma przyczynami, takimi jak:

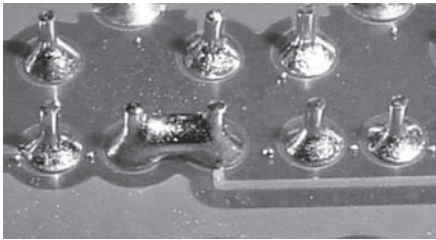
- zbyt mała aktywność topnika,
- zbyt wysoka temperatura w strefie grzania wstępnego,
- zbyt krótki czas kontaktu ze stopionym lutem,
- nierównomierny rozkład temperatury na płycie obwodu drukowanego (w kierunku osi otworu).

Sposobem na zmniejszenie zakresu lub wyeliminowanie tej wady jest właściwy dobór topnika i odpowiednia dla niego charakterystyka temperaturowa strefy grzania wstępnego.

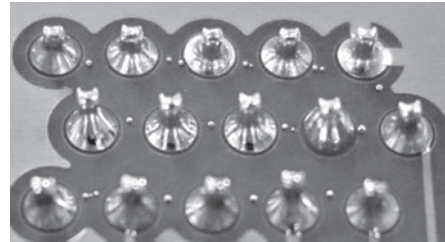
Tworzenie mostków lutu jest główną przyczyną powstawania zwarć w wyniku procesu lutowania na fali, natomiast przyczyną powstawania mostków jest fakt, że lut nie został oddzielony od końcówki/-wek przed jego zestaleniem (rys. 9.8). Zwykle tworzenie mostków jest konsekwencją nadmiaru lutu, ale może być także spowodowane złym projektem mozaiki przewodzącej PCB lub na przykład nieodpowiednim zagięciem końcówki. Przyczyną nadmiernej liczby mostków może być też przedwczesna dezaktywacja topnika spowodowana złą charakterystyką temperaturową strefy grzania wstępnego lub strefy lutowania.



Rys. 9.7. Niewystarczająca ilość lutu w połączeniu podzespołów do montażu przewlekanego [18]



Rys. 9.8. Mostek lutu w procesie lutowania na fali [18]



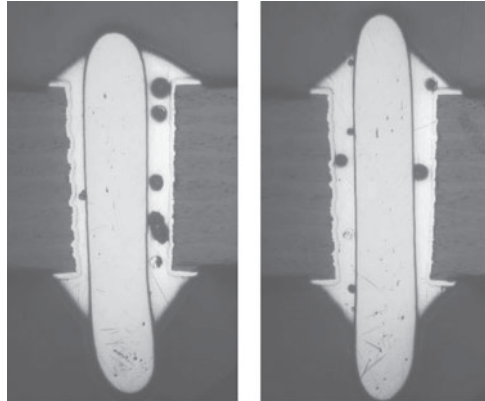
Rys. 9.9. Obecność kulek lutu na powierzchni płytki [18]

W czasie lutowania na fali bardzo często tworzą się sople lub firanki lutu na końcówkach podzespołów do montażu przewlekanego, wystających więcej niż 2 mm od lutowanej powierzchni płytki drukowanej. Im większa powierzchnia tej końcówki, tym wada jest bardziej widoczna. Jedynym rozwiązaniem problemu jest utrzymanie długości wystających końcówek od strony źródła lutu na minimalnym poziomie.

Nadmiar lutu na powierzchni może być przyczyną powstawania kulek lub rozprysków lutu na powierzchni płytki (rys. 9.9). Zwiększony zakres tego zjawiska może być spowodowany zastosowaniem nieodpowiedniej maski przeciwlutowej, która w wyższych temperaturach lutowania ma tendencję do zatrzymywania kulek lutu. Kulki lutu mogą odrywać się lub ulegać przemieszczeniu w trakcie manipulacji lutowanym zespołem, powodując niepożądane zwarcia lub uszkodzenia sąsiednich zespołów. Zaleca się usuwanie kulek ręcznie.

W połączeniach lutowanych stosunkowo łatwo powstaje duża liczba pustych przestrzeni, zwłaszcza przy lutowaniu podzespołów do montażu przewlekanego (rys. 9.10). Wada może być wynikiem zamykania pęcherzy gazów uwalnianych ze ścian metalizowanych otworów przelotowych lub produktów lotnych wydzielających się w wysokich temperaturach lutowania z materiału podłoża płytki obwodu drukowanego. Drugą prawdopodobną

przyczyną jest występowanie na ściankach otworów lub na końcówkach podzespołów obszarów o gorszej lutowności. Jest to związane z mało efektywnym systemem wprowadzania topnika do wnętrza otworów lub stosowaniem topnika o nieodpowiedniej aktywności, w wyniku na przykład zbyt wysokiej temperatury w strefie grzania wstępnego.

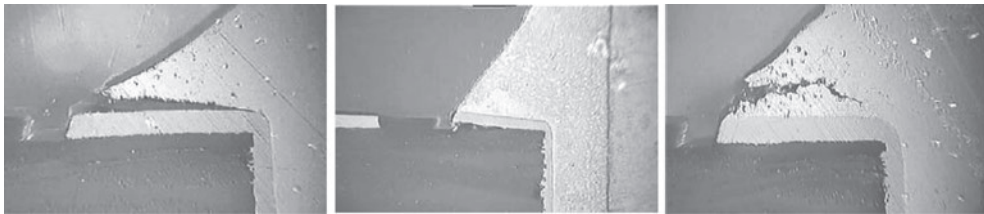


Rys. 9.10. Puste przestrzenie [18]

a)

b)

c)

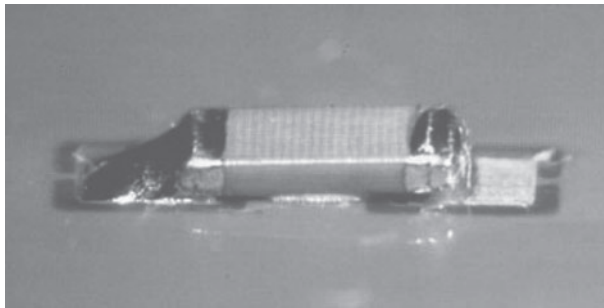


Rys. 9.11. Odrzucanie lutu od podłoża; a) odrzucanie lutu, b) odrzucanie lutu razem z polem metalizacji, c) pęknięcie wypełnienia lutem [18]

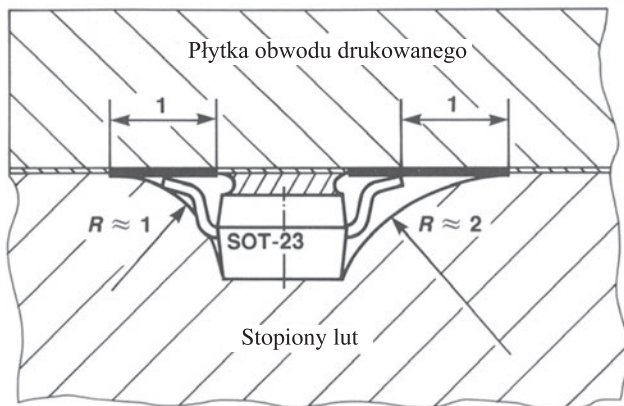
Unoszenie się lub odrzucanie lutu połączenia lutowanego podzespołów do montażu przewlekanego (tzw. *fillet lifting*) jest jedną z najczęściej opisywanych wad lutowania na fali. Płytkę z podzespołami wchodzi na falę lutu, którego temperatura może przekraczać 260 °C. W strefie grzania wstępnego temperatura jest znacznie niższa (rys. 8.22). Tak duża zmiana temperatury w krótkim czasie powoduje, że lutowany zespół poddawany jest szokowi cieplnemu. Podobnie szybko zmienia się temperatura przy zejściu zespołu z fali lutowniczej i chłodzenia. Szybkie chłodzenie powoduje znaczne naprężenia spowodowane różnicami współczynników rozszerzalności cieplnej w osi Z laminatu płytki i metalizacji miedzi otworów przelotowych. Naprężenia te są przyczyną odrzucania się lutu od powierzchni pola metalizacji otworu lub odrzucania się lutu razem z polem metalizacji od powierzchni płytki. Mogą występować także pęknięcia w obszarze lutu (rys. 9.11c). Największe zagrożenie powstaje w przypadku oderwania się lutu razem z polem metalizacji otworu; może ono być przyczyną przerwania obwodu elektrycznego.

9.3. WADY LUTOWANIA W MONTAŻU POWIERZCHNIOWYM

Typową wadą montażu powierzchniowego jest brak połączenia (rys. 9.12). Wada ta często jest wynikiem efektu cieniowania przy lutowaniu na fali w warunkach występowania przeszkody uniemożliwiającej kontakt lutu z powierzchnią przeznaczoną do zwilżania. Pokazano to na rysunku 9.13. Jeżeli pole lutownicze wystaje na długość 1 mm, to promień krzywizny lutu powinien być mniejszy o ok. 2 mm, aby lut zwilżył to pole lutownicze. Jeżeli promień krzywizny lutu jest mniejszy niż ok. 1 mm, to zarówno końcówka, jak i pole lutownicze, wystające na długość 0,5 mm, będą zwilżone przez lut. Efekt cieniowania tłumaczy konieczność wprowadzenia fali turbulentnej do procesu lutowania na fali podzespołów SMD.



Rys. 9.12. Brak połączenia [4]



Rys. 9.13. Wytłumaczenie efektu cieniowania [18]

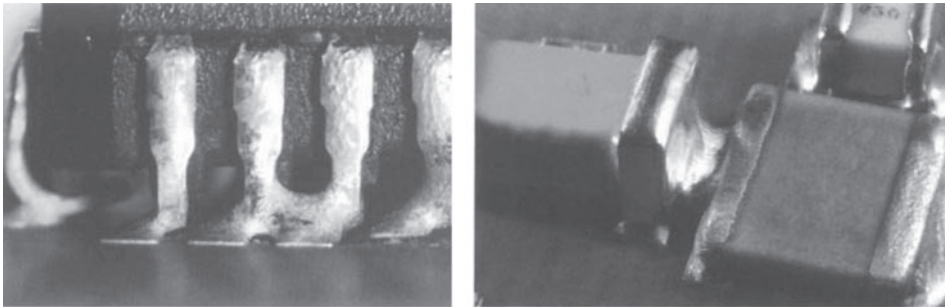
Inną typową wadą występującą w montażu powierzchniowym jest nieprecyzyjne osadzenie elementów w stosunku do pól lutowniczych. Skutki takiego błędu osadzania są oczywiste (rys. 9.14).

Zakładając, że pasta lutownicza została prawidłowo nałożona na pola lutownicze, takie wady lutowania, jak tworzenie mostków lutu, rozprysk kulek lutu i występowanie ku-

lek lutu pod podzespołami są zwykle związane z charakterystyką temperaturowo-czasową procesu lutowania. Tworzenie mostków (rys. 9.15) jest spowodowane najczęściej nadmiernym osiadaniami pasty w podwyższonej temperaturze czy też nadmierną ilością pasty na polu lutowniczym.



Rys. 9.14. Błąd niewłaściwego osadzenia elementów [4]



Rys. 9.15. Mostki lutu w montażu powierzchniowym [18]

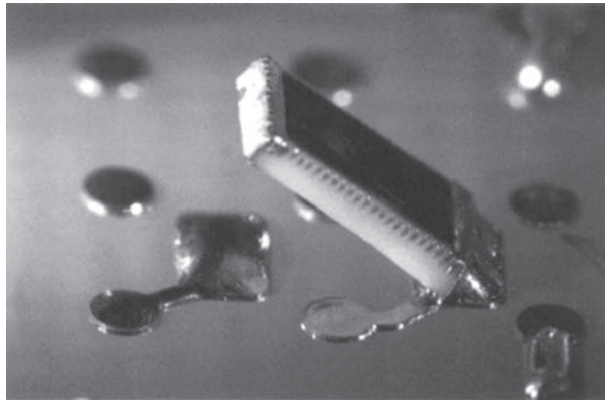
Zjawisko występowania kulek lutu rozproszonych na powierzchni płytki obwodu drukowanego i dookoła podzespołów nazywane jest także kuleczkowaniem lutu. Przyczyną jest zwykle niewłaściwy skład pasty lutowniczej lub nadmierna szybkość grzania. Luźne kulki mogą łatwo odrywać się od powierzchni PCB, powodując ryzyko zwarcia, jak również mogą zmniejszać dopuszczalny odstęp elektryczny między elementami przewodzącymi. Rozproszone kulki lutu usuwa się zmywając powierzchnię.

Kulki lutu przyłączone do korpusu podzespołu lub pod korpusem stanowią wadę lutowania charakterystyczną dla podzespołów R/C (rys. 9.16). Wymiary kulek mogą wynosić od 50 μm do 500 μm w zależności od przyczyny wywołującej ich powstanie. Formowanie się dużych kulek jest przypisywane przede wszystkim nadmiernemu osiadaniami pasty w podwyższonej temperaturze, niewystarczającej rozpląwności, lub zwilżalności pasty na różnych powłokach metalizacji wyprowadzeń podzespołu. Nadmierne

osiadanie pasty może występować na etapie grzania wstępnego, kiedy lepkość pasty się zmniejsza. Wtedy pasta wpływa pod podzespoły pomiędzy ich wyprowadzenia – na zasadzie efektu kapilarnego i w czasie topienia przybiera formę kulek.



Rys. 9.16. Kulki lutu pod kondensatorami ceramicznymi 1206 i 0805 [18]

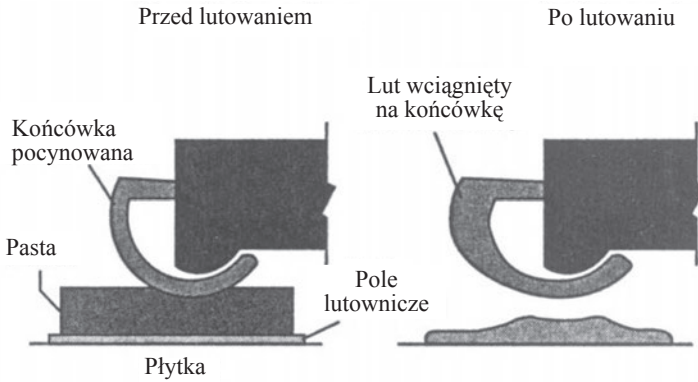


Rys. 9.17. Efekt nagrobkowy [18]

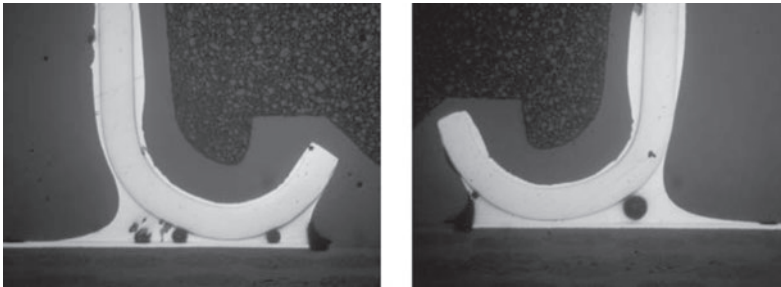
Wada lutowania nazwana efektem nagrobkowym (ang. *tombstoning*) dotyczy przede wszystkim podzespołów R/C. W trakcie procesu rozplwowego jeden koniec podzespołu traci kontakt z polem lutowniczym, a podzespół może przyjąć pozycję prawie pionową (rys. 9.17). Wada ta jest następstwem przede wszystkim różnicy w zwilżalności wyprowadzeń z obu stron podzespołu. Przyczyny tego zjawiska mogą być spowodowane:

- różną lutownością obu wyprowadzeń podzespołu lub obu pól kontaktowych płytki obwodu drukowanego,
- złymi wymiarami pól lutowniczych,
- wadami projektu płytki powodującymi powstawanie w procesie grzania gradientu temperatury wzdłuż korpusu podzespołu,
- nieodpowiednią jakością pasty lutowniczej,
- parametrami procesu lutowania nieodpowiednio dobranymi do konstrukcji lutowanej PCB.

Zjawisko wciągania lutu polega na przejmowaniu większości stopionego lutu przez końcówkę podzespołu pokrytą, np. dobrze zwilżalną warstwą cyny. W konsekwencji takiego przemieszczania się lutu, brakuje go na powierzchni pola lutowniczego i nie może powstać połączenie. Zjawisko wciągania lutu jest przede wszystkim powodowane różnicami w temperaturze podzespołu i płytki w czasie lutowania oraz różnicą w szybko-



Rys. 9.18. Zjawisko wyciągania lutu na końcówkę podzespołu [18]



Rys. 9.19. Puste przestrzenie w połączeniu lutowanym [18]

ści zwilżania ich powierzchni kontaktowych. Jeżeli końcówka podzespołu (rys. 9.18) jest bardziej gorąca niż płytka, to pasta będąca w kontakcie z tą końcówką zacznie topić się pierwsza. Siła napięcia powierzchniowego spowoduje, że powierzchnia lutowna końcówki będzie absorbować lut i wciągać go po końcówce do momentu, w którym pole lutownicze płytki nie będzie wystarczająco gorące, aby rozpoczęło się jego zwilżanie przez lut.

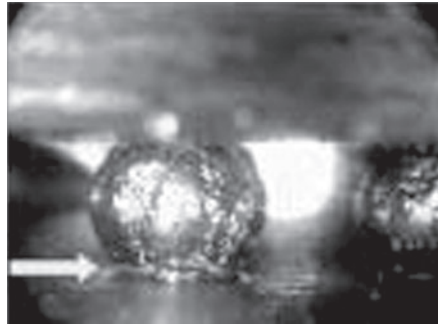
W połączeniach montowanych powierzchniowo mogą pojawiać się puste przestrzenie w objętości lutu (rys. 9.19). Przyczyny powstawania tej wady są podobne do przyczyn występujących w montażu przewlekany.

9.4. WADY POŁĄCZEŃ LUTOWANYCH WYKONANYCH TECHNIKĄ FLIP CHIP

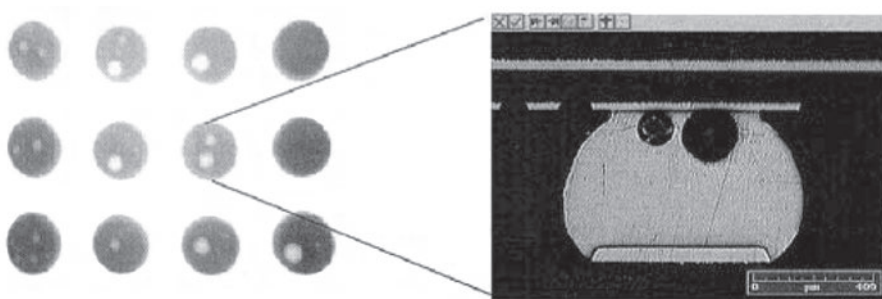
Wprowadzenie stopów bezołowiowych i w konsekwencji wyższe temperatury lutowania spowodowały, że niektóre wady połączeń podzespołów PBGA, mikroBGA, CSP nieobudowanych struktur półprzewodnikowych montowanych techniką flip chip mogą mieć charakter dominujący. Są to wady takie, jak:

- brak całkowitego zwilżenia pól lutowniczych (rys. 9.20),

- formowanie zimnych połączeń lutowanych z powodu zbyt niskiej temperatury pod obudową podzespołu,
- większa liczba mikrokulek lutu rozprysniętych na powierzchni płytki pod obudową; nie ulegają one zestaleniu razem z lutem znajdującym się na polu lutowniczym,
- możliwość delaminacji i pęknięcia połączeń lutowanych (rys. 4.20) spowodowanych większymi naprężeniami cieplnymi w połączeniu (wyższe temperatury lutowania i większe różnice współczynników rozszerzalności cieplnej),
- występowanie pustych przestrzeni w objętości połączenia (rys. 9.21), które mogą powodować wzrost rezystancji złącza.



Rys. 9.20. Wady połączeń lutowanych podzespołów PBGA; brak całkowitego zwilżenia pól lutowniczych [18]



Rys. 9.21. Puste przestrzenie zdiagnozowane defektoskopem rentgenowskim (po lewej) i potwierdzone po wykonaniu zglądów [4]

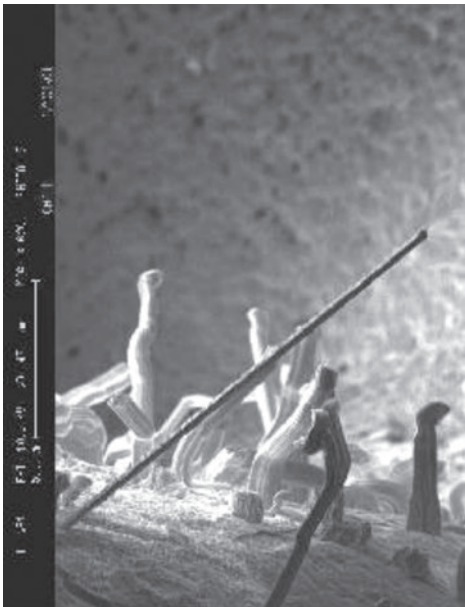
Częstość, ilość oraz wielkość pustych przestrzeni obserwowanych w połączeniach bezołowiowych spowodowała, że ustalono konsensus, według którego te puste przestrzenie, zwykle możliwe do wykrycia za pomocą defektoskopu rentgenowskiego, mogłyby być warunkiem odrzucenia wyrobu. Przyjęto, że połączenie jest wadliwe, jeżeli obszar pustej przestrzeni przekracza 25% obszaru obrazu rentgenowskiego połączenia lutowanego.

9.5. WADY SPECYFICZNE DLA LUTÓW BEZOŁOWIOWYCH

Jednym z dominujących w montażu elektronicznym stopów lutowniczych bezołowiowych jest stop określany akronimem SAC, o składzie Sn–Ag–Cu zawierający ponad 95% cyny. Duża zawartość cyny jest przyczyną powstawania specyficznych wad, a mianowicie zarazy cynowej i kryształów włóknistych, tzw. wiskerów.

Cyna tworzy odmiany alotropowe. W warunkach normalnych występuje w odmianie β zwanej cyną białą, trwałą powyżej 13,2 °C. Odmiana ta ma sieć krystaliczną w układzie tetragonalnym, o gęstości 7,3 g/cm³. W temperaturach niższych cyna przechodzi w odmianę regularną α o gęstości 5,85 g/cm³. Zmiana gęstości jest równoznaczna ze zmianą objętości, co powoduje, że cyna rozpada się, tworząc szary proszek zwany cyną szarą. Zjawisko to nazywane jest zarazą cynową.

Wisker (ang. *whisker*) to elektrycznie przewodzący, włosowaty kryształ spontanicznie wyrastający z powierzchni stopów oraz czystego metalu, głównie cyny, ale także cynku, indu i antymonu (rys. 9.22). Wiskery osiągają długości dochodzące nawet do kilku milimetrów, przy czym ich średnica zawiera się zazwyczaj w granicach 1–5 μm . Wiskery jako struktury krystaliczne metalu są elektrycznie przewodzące, a więc mogą powodować zwarcia elektryczne pomiędzy sąsiadującymi polami lutowniczymi, ścieżkami przewodzącymi lub wyprowadzeniami elementów (rys. 9.23). Stwarza to ogromny problem w uzyskiwaniu niezawodnych połączeń elektrycznych, a co za tym idzie, hamuje miniaturyzację i gęstości upakowania układów elektronicznych.



Rys. 9.22. Kryształy włosowe (wiskery) wyrastające z metalowej powierzchni [27]



Rys. 9.23. Zwarcie wiskerami pomiędzy wyprowadzeniami [27]

Zwarcia powodowane występowaniem wiskerów mogą być trwałe bądź przejściowe, mogą też powodować formowanie łuku elektrycznego. Zwarcia trwałe są zwykle przyczyną nieprawidłowej pracy urządzenia, niekoniecznie powodując jego uszkodzenie. Zwarcia chwilowe występują wówczas, gdy wartość prądu płynącego przez włosowaty kryształ jest w stanie przerwać jego strukturę. Progowe natężenie prądu, przy którym nastąpi przerwanie (stopnienie) wiskera zależy głównie od jego przekroju i długości.

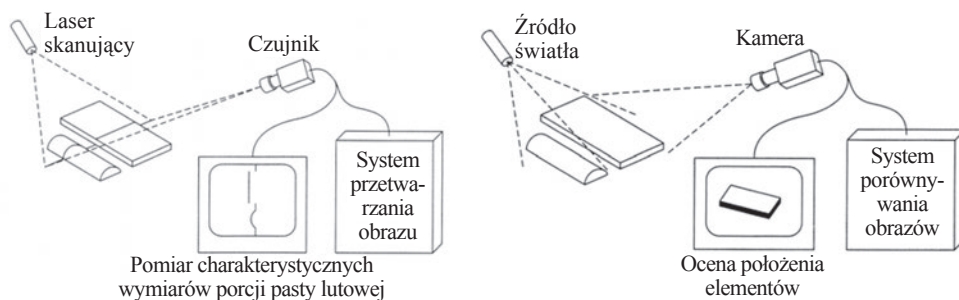
W warunkach, gdy wisker zainicjuje zwarcie pomiędzy elementami o dużej różnicy potencjałów, może nastąpić wyładowanie łukowe. Wtedy stała struktura wiskerów odparowuje i powstaje plazma o silnie przewodzących jonach metali, a natężenie uformowanego łuku może dojść nawet do setek amperów, powodując znaczne zniszczenia zespołów elektronicznych.

Monokrystaliczna struktura wiskerów powoduje, że mają one dużą wytrzymałość na naprężenia mechaniczne, dlatego mogą również powodować uszkodzenia mechaniczne subtelných struktur systemów mikroelektro-mechanicznych lub doprowadzić do zanieczyszczenia wszelkiego rodzaju układów optycznych czujników.

9.6. METODY KONTROLI JAKOŚCI POŁĄCZEŃ LUTOWANYCH

Pierwszym etapem w ocenie jakości połączeń lutowanych jest kontrola wizualna, którą przeprowadza się najczęściej, używając lupy o pojedynczym, dużym polu widzenia. W normach zalecane jest stosowanie powiększenia od $2\times$ do $15\times$. Główna wada kontroli optycznej polega na tym, że jest ona subiektywna, zależna od osoby oceniającej.

Do oceny połączeń po lutowaniu wielu wykonawców montażu stosuje automatyczne systemy optyczne (ang. *Automatic Optical Inspection* AOI) lub automatyczną kontrolę rentgenowską (*AXI*). Systemy AOI porównują zarejestrowane obrazy ze wzorcem i w ten sposób mogą wykryć nieprawidłowości w nałożeniu pasty lutowniczej lub osadzeniu elementów (rys. 9.24).

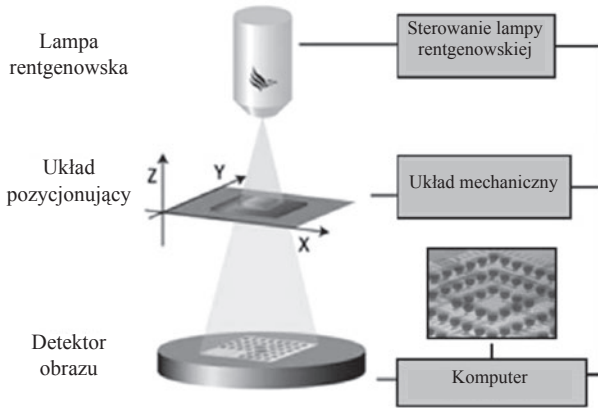


Rys. 9.24. Automatyczne systemy optyczne do oceny prawidłowości druku pasty lutowniczej i osadzenia elementu SMD [4]

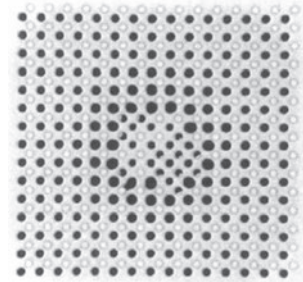
Wysoko zaawansowane automatyczne urządzenia rentgenowskie mogą dostarczyć danych dotyczących średnicy, wielkości powierzchni i kształtu połączeń oraz procentowej

zawartości pustych przestrzeni. Pozwala to na prowadzenie automatycznej kontroli i odrzucenie podzespołów z połączeniami wadliwymi.

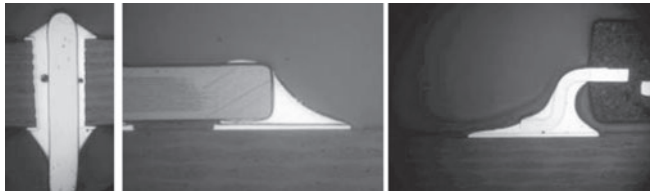
Metoda rentgenowska badania struktury wewnętrznej połączeń lutowanych opiera się na zjawisku promieniowania rentgenowskiego (ang. *X-Ray*), które jest emitowane przez lampę rentgenowską umieszczoną nad badanym zespołem elektronicznym. Promieniowanie rentgenowskie propaguje się po liniach prostych (rys. 9.25), tworząc obraz w skali szarości zależnej od stopnia pochłaniania promieniowania przez badane obiekty. Przykład wadliwego połączenia struktury BGA pokazano na rys. 9.26. Zmiana kąta padania promieniowania na obiekt i tworzenie serii rejestracji w tzw. tomografii komputerowej pozwala na otrzymywanie obrazów przestrzennych.



Rys. 9.25. Schemat działania metody rentgenowskiej w badaniach połączeń lutowanych [20]



Rys. 9.26. Wady połączenia struktury BGA ujawnione kontrolą rentgenowską [4]

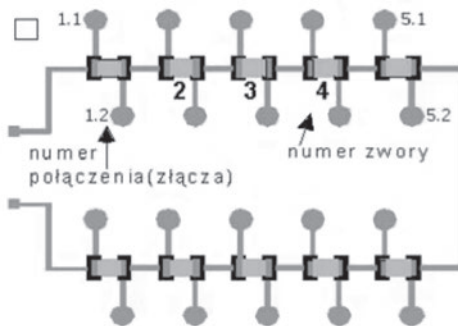


Rys. 9.27. Zgłady metalograficzne połączeń lutowanych wykonanych w montażu przewlekany i powierzchniowy [18]

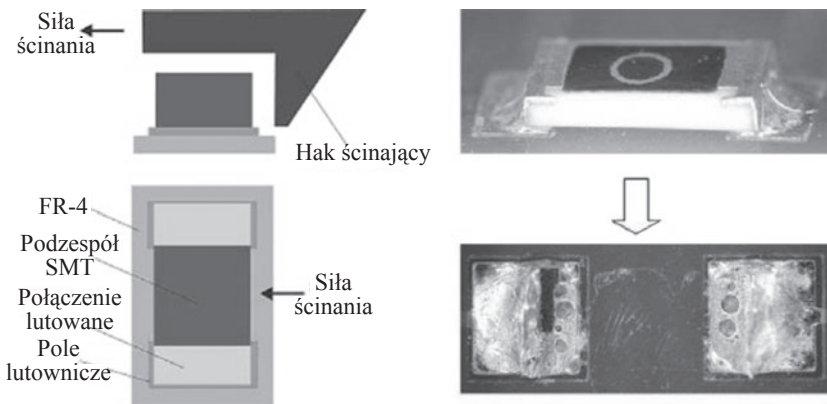
Bardzo przydatne są dane bazujące na zgłdach metalograficznych połączeń bezpośrednio po lutowaniu i po próbach przyspieszonego starzenia. Zgłady metalograficzne (rys. 9.27) pozwalają na dokładną ocenę kształtu i wypełnienia lutem oraz na ocenę wad wewnętrznych połączenia lutowanego i ewentualnych wad wewnętrznych płytki obwodu drukowanego spowodowanych, na przykład zbyt wysokimi temperaturami lutowania. Jest to badanie niszczące i może być prowadzone w celu optymalizacji technologii lutowania lub dla wybranych próbek, do statystycznej kontroli procesu.

Szeroko rozpowszechnionym badaniem jest sprawdzanie ciągłości elektrycznej łańcucha połączeń elektrycznych płytki drukowanej (ang. *daisy chain*) z zamontowanymi rezystorami o rezystancji zerowej (zwory), rys. 9.28. Stopień uszkodzenia połączenia lutowanego może być oceniany za pomocą czteropunktowego pomiaru rezystancji.

Także badania wytrzymałości połączeń lutowanych podzespołów biernych SMD na ścinanie i wytrzymałości połączeń lutowanych podzespołów czynnych na wrywanie końcówek są badaniami łatwymi do przeprowadzenia, ale tylko w małym stopniu odzwierciedlają warunki pracy. Są natomiast bardzo przydatne do porównywania właściwości różnych stopów w zastosowaniach o małym stopniu ryzyka. Sposób badania pokazano na rys. 9.29.



Rys. 9.28. Łańcuch połączeń do badania rezystancji połączeń lutowanych [2]



Rys. 9.29. Schemat układu do pomiaru sił ścinania połączeń lutowanych [20]

Do oceny jakości połączeń lutowanych bezpośrednio po lutowaniu, a także po testach starzeniowych (symulujących wieloletnie użytkowanie) stosowane są testy bazujące na próbach zmęczeniowych, wykorzystujących wibracje, wielokrotne cykle cieplne, udary i inne narażenia. Szerzej problemy te omówiono w rozdziale 13.

10. MYCIE PO PROCESIE LUTOWANIA

10.1. ZANIECZYSZCZENIA

Po procesach produkcyjnych związanych z wytwarzaniem PCB, a także po lutowaniu, powstały zespół elektroniczny jest pokryty zwykle substancjami traktowanymi jako zanieczyszczenia. Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje zanieczyszczeń. Są to:

- zanieczyszczenia polarne; jonowe i nieorganiczne, takie jak aktywatory topników i pozostałości topników po lutowaniu, sole z procesów galwanicznych i trawienia, środki neutralizujące, sole z rąk obsługi,
- zanieczyszczenia niepolarne; niejonowe, organiczne, takie jak cząstki stałej kalafonii, oleje, smary, woski, kremy do rąk, poliglikole, produkty degradacji, zwilżacze,
- cząstki stałe zawieszone w powietrzu, takie jak cząstki żywicy i włókienka szklane z mechanicznej obróbki laminatów, kulki lutu z procesu lutowania, kurz z powietrza, włókienka z ubrania, cząstki skóry, włosów i brud z rąk obsługi.

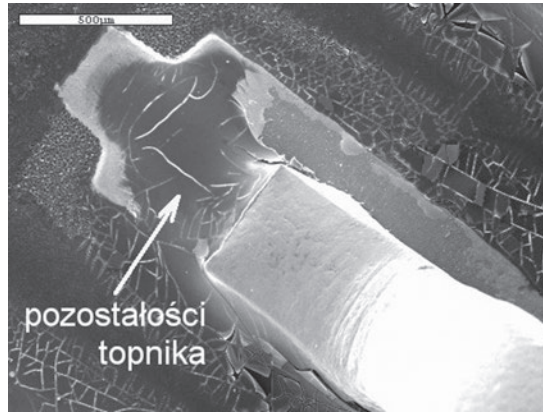
Najgroźniejszymi zanieczyszczeniami są zanieczyszczenia jonowe, to znaczy takie, które pod wpływem wody rozpadają się na jony i są zdolne do przewodzenia prądu. Przykładem tego rodzaju zanieczyszczenia może być chlorek sodu występujący w pocie ludzkim, który pod wpływem wilgoci ulega rozpuszczeniu i rozpadowi na dodatni jon sodu i ujemny jon chloru:



W procesie lutowania źródłem jonów mogą być użyte topniki (aktywatory i nośniki aktywatorów), produkty termicznej degradacji topników (co występuje szczególnie w wyższej temperaturze lutowania stopami bezołowiowymi), produkty reakcji pomiędzy topnikami a tlenkami występującymi na końcówkach elementów lutowanych i na lucie. Przykład zanieczyszczenia w postaci nieusuniętego w procesie lutowania topnika pokazano na rys. 10.1.

Niejonowe składniki topników, jak glikole, szczególnie te o małej masie cząsteczkowej, są silnie higroskopijne. Mogą więc one absorbować wilgoć z powietrza i wspomagać procesy elektromigracji i degradacji parametrów elektrycznych, zwłaszcza w obecności nawet nieznacznej ilości zanieczyszczeń jonowych.

Inne zanieczyszczenia, takie jak kurz, pył w różny sposób mogą wpływać na pracę układów elektronicznych. Dlatego też zaleca się utrzymywanie w pomieszczeniach produkcyjnych czystości na poziomie zapobiegającym zanieczyszczeniu lub pogorszeniu jakości narzędzi lutowniczych, materiałów i powierzchni przeznaczonych do lutowania.



Rys. 10.1. Pozostałości topnika nieusunięte w procesie lutowania [4]

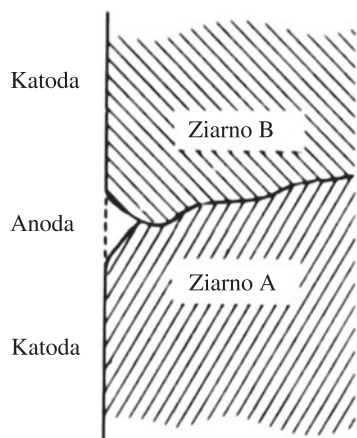
Na szczególną uwagę zasługują zanieczyszczenia pochodzące z bezpośredniego kontaktu z rękami obsługi. Odciski palców zawierają głównie oleje, wodę, sól, lecz także kwasy aminowe i mocznik. Ponadto ręce są zwykle pokryte warstwą kosmetyków, takich jak żele, kremy, których niekiedy nie można do końca zmyć płukaniem rąk w wodzie. Na skórze rąk znajdują się też substancje organiczne, wydalone z organizmu z potem, jak alkohol, oleje, a nawet silikon. Dlatego, jeśli jest to możliwe, wszyscy pracownicy obsługujący montaż zespołów elektronicznych na płytkach obwodów drukowanych nie powinni dotykać gołymi rękami montowanych zespołów.

10.2. SKUTKI ZANIECZYSZCZEŃ

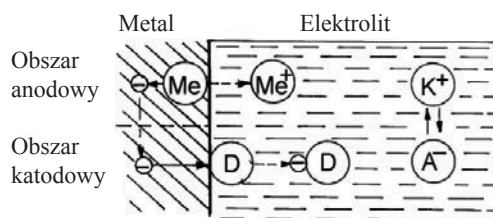
Pozostawienie zanieczyszczeń jonowych, szczególnie chlorków i bromków na podłożu, może wywoływać procesy chemicznej czy elektrochemicznej korozji. Zazwyczaj korozja elektrochemiczna powstaje na skutek wystąpienia różnicy potencjału pomiędzy różnymi metalami, które mają ze sobą kontakt poprzez wilgoć i przepływ prądu ułatwiony obecnością jonów w wilgoci. Korozja możliwa jest także na powierzchni jednego metalu. Metale mają mikrostrukturę ziarnistą, krystaliczną, a granice ziaren w stosunku do ich wnętrza mają strukturę mniej uporządkowaną. Energia granic ziaren jest wyższa niż samego ziarna, toteż w zetknięciu z elektrolitem granice te stają się obszarem anodowym, a obszar ziarna mający niższą energię – obszarem katodowym. W efekcie powstają lokalne mikroogniwa (rys.10.2).

Proces korozji elektrochemicznej można przedstawić jako elementarny proces anodowego utleniania i katodowej redukcji. W reakcji utleniania atom metalu M zawierający n elektronów walencyjnych staje się jodem dodatnim M^+ i uwolnionych zostaje n elektronów



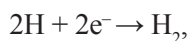


Rys. 10.2. Powstawanie mikroogniw na powierzchni metalu

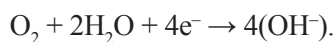
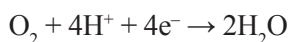


Rys. 10.3. Reakcje utleniania i redukcji procesu korozji elektrochemicznej; D – depolaryzator [28]

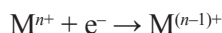
Elektrony migrujące z obszaru anodowego łączą się z depolaryzатorem, tj. jonem lub atomem mającym zdolność do przyłączania elektronów (rys. 10.3). Depolaryzатorem może być jon wodoru lub atom tlenu. Reakcje redukcji mogą przebiegać w sposób następujący:



lub



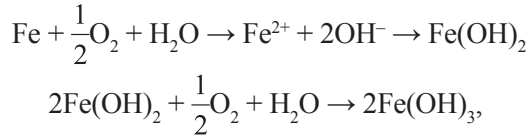
Jony metali (kationy) także podlegają redukcji częściowej



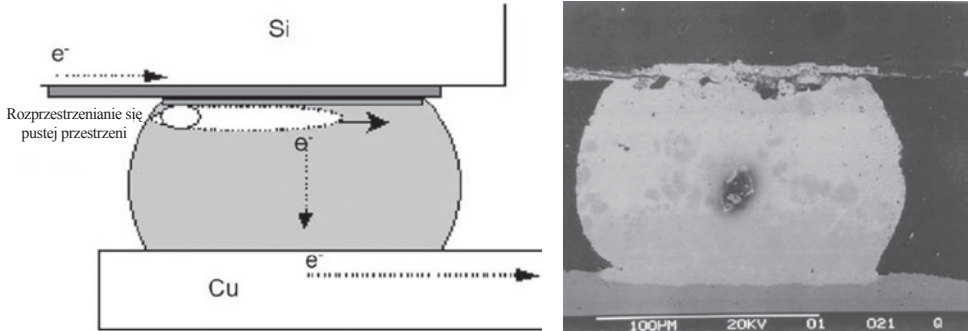
lub całkowitej



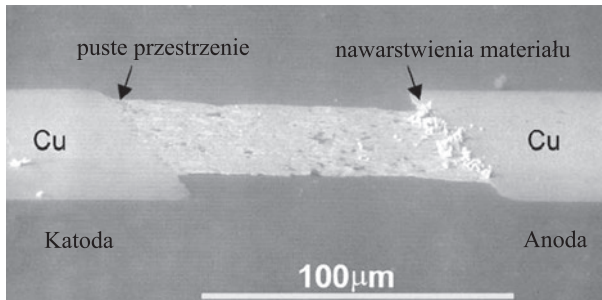
w reakcjach z elektronami lub anionami. Konsekwencją jest zubożanie warstwy metalu i powstawanie nowych związków. Jako przykład powstawania nowych związków podaje się często proces rdzewienia żelaza w wodzie zawierającej rozpuszczony tlen. Proces ten przebiega w dwóch etapach



a związek $\text{Fe}(\text{OH})_3$ jest znaną wszystkim rdzą.



Rys. 10.4. Rozprzestrzenianie się pustej przestrzeni w obszarze kontaktu podwyższonego wskutek elektromigracji; zasada transportu masy i kontakt podwyższony ze stopu SnAg poddany wielogodzinemu obciążeniu prądem 2,5 A w temperaturze 150 °C [29]



Rys. 10.5. Połączenie między miedzianymi strukturami powstałe wskutek elektromigracji materiału wg [29]

Niepożądanym skutkiem zanieczyszczeń jest absorpcja wilgoci, skutkiem czego wzrasta powierzchniowa przewodność elektryczna materiału. W zanieczyszczeniach jonowych zmniejszenie się oporności powierzchniowej (np. PCB) jest spowodowane obecnością nośników prądu. Nawet czysta woda (destylowana) wykazuje pewną przewodność elektryczną związaną z jej wewnętrzną jonizacją



Wilgoć wspomaga procesy elektromigracji. Zjawisko elektromigracji występuje przy dużym natężeniu prądu i podwyższonych temperaturach. Polega ono na transporcie masy jonów metalu, a w konsekwencji tworzeniu się przerw lub pustych przestrzeni (rys. 10.4) oraz nawarstwień materiałów. W wypadku płaskich struktur, w obecności wody, wskutek transportu masy mogą powstawać połączenia z pustkami w pobliżu katody i nawarstwieciem materiału przy anodzie (rys. 10.5).

Doskonałym elektrolitem wodnym wspomagającym efekt elektromigracji mogą być nieusunięte pozostałości topnika halogenowego rozpuszczonego w wodzie z wilgoci.

10.3. MYCIE I ŚRODKI MYJĄCE

W zależności od wielkości produkcji, mycie zespołów elektronicznych po lutowaniu prowadzi się albo w partiach, w myjkach stacjonarnych lub ręcznie, albo w sposób ciągły, w linii produkcyjnej. Stosowane są różnego rodzaju systemy wspomagające (np. natrysk, szczotkowanie), a do mycia używa się rozpuszczalników, wody i innych cieczy. Na uwagę zasługuje mycie w parach rozpuszczalników. Wykorzystuje się tu pary wrzącego rozpuszczalnika, który osiadając na zawieszonych zimnych zespołach kondensuje i rozpuszcza zanieczyszczenia, a ściekając, usuwa je. Mycie ultradźwiękowe może uszkodzić montowane elementy i dlatego ten sposób mycia jest ograniczany do usuwania zanieczyszczeń z płytek obwodów drukowanych przed procesem montażu. Istotną rolę może odgrywać czas. Pozostałość topnika powinna zostać usunięta tak szybko, jak to jest możliwe, najlepiej w czasie 15 minut, ale nie dłużej niż w czasie 1 godziny po lutowaniu.

Dobrym rozpuszczalnikiem usuwającym zanieczyszczenia po lutowaniu są freony, zawierające chlorofluorowęglowodory. Jednakże ze względu na destrukcyjny wpływ tych związków na ozonową warstwę stratosfery, chroniącą Ziemię przed nadmiernym, niebezpiecznym promieniowaniem ultrafioletowym, wyeliminowano je z użycia w elektronice. Spowodowało to stosowanie alternatywnych środków, a także wprowadzanie rozpuszczalnych w wodzie past lutowniczych oraz topników tzw. *VOC-free*, czyli wolnych od lotnych rozpuszczalników, zalecanych do procesów lutowania bezołowiowego.

Alternatywne rozpuszczalniki, dopuszczone do stosowania w montażu elektronicznym, powinny

- charakteryzować się małą wartością napięcia powierzchniowego,
- rozpuszczać zanieczyszczenia jonowe i niejonowe,
- być niepalne,
- nie reagować z materiałami płytki obwodu drukowanego, materiałami montowanych elementów i spoiw, materiałem maski przeciwlutowej,
- być nietoksyczne dla człowieka.

Nie wszystkie stosowane rozpuszczalniki spełniają podane wymagania. Na przykład alkohole dobrze rozpuszczają niejonowe zanieczyszczenia i w ograniczonym stopniu mają też możliwość rozpuszczania zanieczyszczeń jonowych. Jednak popularnie stosowany alkohol izopropylowy jest palny, a jego opary w pewnym stężeniu grożą wybuchem. Z te-

go względu mycie alkoholem izopropylowym należy przeprowadzać z należytą ostrożnością. Jego napięcie powierzchniowe wynosi ok. 22 mN/m, dobrze więc usuwa zanieczyszczenia z powierzchni.

Trójchlorotrójfluoroetan i inne niechlorowane fluorowęglowodory są używane do mycia w parze rozpuszczalnika. Charakteryzują się bardzo niskim napięciem powierzchniowym, ok. 20 mN/m, które umożliwia im doskonale usuwanie pozostałości z powierzchni. Doskonale rozpuszczają zanieczyszczenia niejonowe, ale nie rozpuszczają pozostałości jonowych. Do zalet tych rozpuszczalników należy niepalność, natomiast do wad można zaliczyć możliwość rozpuszczania niektórych tworzyw i farb do znakowania podzespołów.

W myciu półwodnym zasadniczy proces mycia przebiega z użyciem zmywaczy organicznych, które rozpuszczają niejonowe pozostałości, natomiast usuwanie pozostałości jonowych następuje w procesie płukania wodą. Do najczęściej stosowanych rozpuszczalników w tym procesie mycia należą terpeny, alifatyczne węglowodory, glikol dwuetylowy i alkoksypopropanol, które są lotnymi związkami organicznymi. Ulegają one biologicznej degradacji, nie niszczą warstwy ozonowej i dlatego uznawane są za przyjazne dla środowiska.

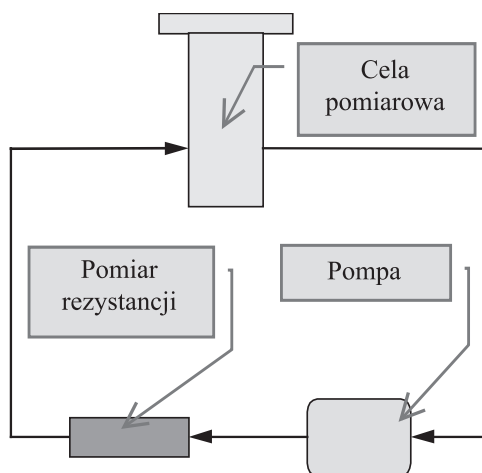
Najtańszym zmywaczem jest woda. Istotną wadą takiego mycia jest to, że woda nie usuwa pozostałości topników kalafoniowych, a jej duże napięcie powierzchniowe (ok. 73 mN/m w 20 °C) utrudnia usuwanie zanieczyszczeń spod podzespołów. Stosowanie w coraz większym zakresie topników wodnych spowodowało zwiększone zainteresowanie myciem wodnym, szczególnie z dodatkiem zwiłzaczy, które obniżając napięcie powierzchniowe, umożliwiają wpływanie wody nawet między gęsto upakowane podzespoły na płytkach obwodów drukowanych. Do płukania powinna być używana woda dejonizowana, wymagane jest także suszenie po tym procesie. Woda jest rozpuszczalnikiem bezpiecznym, niepalnym, ma doskonale właściwości rozpuszczania jonowych zanieczyszczeń.

10.4. KONTROLA CZYSTOŚCI

Podjęcie decyzji o myciu lub oceny czystości po procesach usuwania zanieczyszczeń może polegać na ocenie wizualnej w celu stwierdzenia obecności lub brak obecności cząstek ciał obcych, kurzu lub pozostałości topnika. Tą metodą nie da się jednak ocenić zawartości zanieczyszczeń jonowych.

Całkowita zawartość zanieczyszczeń jonowych na płytkach obwodów drukowanych czy zmontowanych zespołach elektronicznych jest możliwa do określenia metodami ekstrakcji, czyli wyplukiwania tych zanieczyszczeń z powierzchni PCB roztworami o odpowiednim składzie i oznaczania zmiany przewodności lub rezystancji właściwej roztworu ekstrahującego. Stosuje się roztwory testowe zawierające 75% objętości izopropanolu i 25% objętości wody dejonizowanej (lub 50 %/50 %). Założenie tych metod jest takie, że początkowa rezystywność roztworu nie powinna być mniejsza niż 20 MΩ·cm.

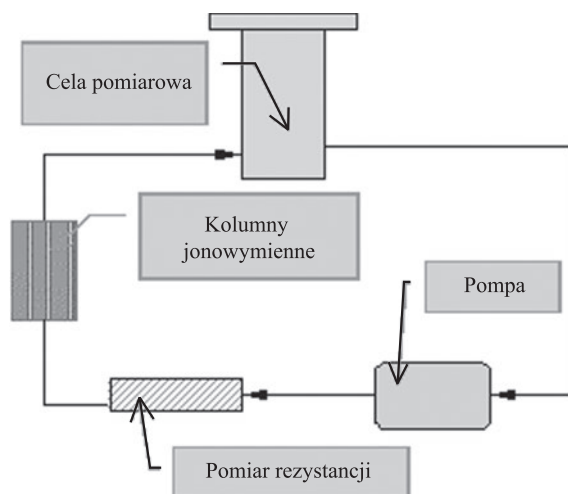
O dokładności pomiaru decyduje sposób przeprowadzenia ekstrakcji, jej intensywność i powtarzalność. Stosowane są dwie metody badania zanieczyszczeń jonowych: statyczna lub dynamiczna – w zależności od sposobu przeprowadzenia procesu ekstrakcji. W metodzie statycznej ekstrakcję przeprowadza się w stałej objętości roztworu (rys. 10.6). Zawartość zanieczyszczeń jonowych w roztworze ekstrahującym wzrasta aż do osiągnięcia stężenia równowagowego. Przykład jonografu (miernika zanieczyszczeń jonowych) pokazano na rys. 10.7.



Rys. 10.6. Zasada pomiaru zanieczyszczeń jonowych metodą statyczną [18]



Rys. 10.7. Jonograf CM11 Multicore do pomiaru poziomy zanieczyszczeń jonowych [30]



Rys. 10.8. Zasada pomiaru zanieczyszczeń jonowych metodą dynamiczną [18]

W metodzie dynamicznej zapewnia się stały przepływ roztworu ekstrahującego, a próbka pomiarowa jest stale omywana świeżym roztworem (rys. 10.8). Za koniec pomiaru przyjmuje się najniższą stabilną rezystywność roztworu. W obu metodach przyrządy przeliczają wynik pomiaru na równoważną zawartość jonów soli (NaCl) na badanej powierzchni, dlatego wynik zawartości zanieczyszczeń jonowych podawany jest w $\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$.

W zależności od przeznaczenia sprzętu normy i przepisy określają dopuszczalną zawartość zanieczyszczeń jonowych. Według aktualnej normy PN-EN 61191-1 [31] zespoły łączone w technologii lutowania bezołowiowego powinny być badane na zawartość zanieczyszczeń powierzchniowych metodą dynamiczną lub metodą statyczną i powinny wykazywać wartość poniżej $1,56 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ NaCl, która jest równoważna jonowej lub dającej się zjonizować pozostałości topnika. Norma podaje również wymagania dotyczące maksymalnego, dopuszczalnego poziomu pozostałości topnika kalafoniowego na zespołach po myciu.

11. KLEJE I KLEJENIE

Kleje mogą być stosowane na wszystkich poziomach montażu. Jednak ich funkcje mogą być różne. Kleje stosowane w montażu aparatury elektronicznej można podzielić na strukturalne, przewodzące elektrycznie i przewodzące ciepłnie. Ten ogólny podział wynika z głównych funkcji spełnianych przez połączenia klejowe, przy czym kleje przewodzące spełniają też rolę klejów strukturalnych, zapewniających mechaniczne połączenie elementów.

Kleje strukturalne są stosowane do wykonywania obciążonych i nieobciążonych połączeń mechanicznych. Połączenia nieobciążone są powszechnie stosowane w montażu powierzchniowym do mocowania elementów na płytkach drukowanych lutowanych na fali. Do tej grupy należą też kleje uszczelniające oraz kleje wypełniające, których głównym zadaniem jest absorpcja naprężeń cieplnych lub tłumienie drgań. Kleje przewodzące ciepłnie są stosowane w celu zmniejszenia oporności cieplnej styku pomiędzy elementem wydzielającym ciepło i odbiornikiem (np. radiatorem), natomiast kleje przewodzące elektrycznie – dla zapewnienia kontaktu elektrycznego pomiędzy elementem i polem kontaktowym płytki obwodu drukowanego.

Klejenie jest to proces polegający na naniesieniu ciekłego kleju na łączone powierzchnie, złożeniu ich ze sobą i spowodowanie zestalenia się kleju w spoinie w procesie utwardzania tak, by nastąpiło mechaniczne połączenie materiałów ze sobą. Siły wzajemnego oddziaływania spoiny klejowej i powierzchni łączonych mają charakter sił elektrostatycznych. Obszary względnie dodatnie i ujemne na powierzchni materiału przyciągają się nawzajem powodując ich wzajemną adhezję. Drugim, oprócz adhezji warunkiem, jaki musi spełniać klej, jest zdolność tworzenia spoiny o odpowiedniej wytrzymałości wynikającej z dostatecznie dużej kohezji, siły działającej pomiędzy cząsteczkami w obrębie materiału, powodującej jego spójność.

11.1. KLEJE STRUKTURALNE

W procesie lutowania na fali podzespoły SMD muszą być przyklejone do płytki przed lutowaniem (rys. 11.1). Operację tę opisano w rozdziale 7.3. Stosowany do tego klej strukturalny powinien cechować się:

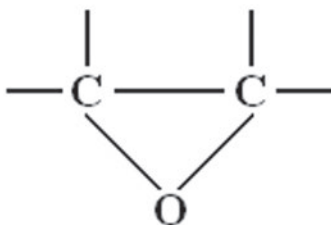
- wystarczającą lepkością w celu ograniczenia osiadania/rozpływu,
- odpowiednią kleistością, pozwalającą na utrzymanie podzespołu po osadzeniu i w czasie manipulacji przed utwardzeniem,

- przyczepnością zarówno do podłoża, jak i do materiałów spodu podzespołów i posiadaniem odpowiedniej wytrzymałości na ścinanie w temperaturze lutowania (zapewnienie stabilnego położenia elementu przy uderzeniu czoła fali lutu),
- małą zawartością wolnych jonów, zgodną z wymaganiami montażu,
- być odpornym na warunki, w jakich zachodzi proces lutowania.



Rys. 11.1. Stosowanie kleju strukturalnego przed procesem lutowania na fali wg [32]

O przyczepności kleju do podłoża, a w konsekwencji o wytrzymałości mechanicznej połączenia decyduje adhezja. Adhezja to oddziaływanie pomiędzy dwoma materiałami, występujące przy powierzchni styku w warunkach, gdy nastąpi zwilżenie klejem w stanie ciekłym tej powierzchni.



Rys. 11.2. Grupa epoksydowa [33]

Adhezja wynika z oddziaływań międzycząsteczkowych stykających się substancji. Granica między adhezją i zjawiskami powierzchniowymi zachodzącymi pod wpływem tworzenia się wiązań chemicznych jest trudna do jednoznacznego określenia. Wynika to z faktu, że prawidłowe zwilżanie powierzchni przez klej może być wywołane siłami wiązań chemicznych, adsorpcji fizycznej i chemicznej, elektrostatycznymi lub innymi siłami przyciągania. W praktycznych, inżynierskich badaniach skuteczności działania klejów, przez adhezję rozumie się siłę połączenia dwóch warstw klejonego materiału bez wnika-
nia w naturę oddziaływań powodujących powstanie trwałej spoiny.

Na wytrzymałość mechaniczną klejonej spoiny mogą mieć wpływ następujące czynniki:

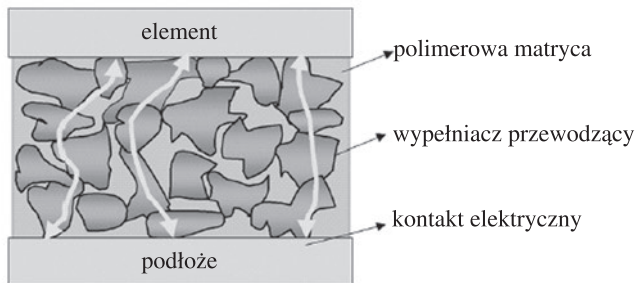
- rodzaj i siła chemicznego oddziaływania kleju z klejonymi powierzchniami (jeśli klej reaguje chemicznie z podłożem, tworząc z nim wiązania chemiczne, wtedy taka spoina jest zazwyczaj bardziej wytrzymała),
- głębokość penetracji klejonego materiału przez klej (oczywiście im większa głębokość penetracji tym lepiej),

- wytrzymałość mechaniczna samej warstwy kleju,
- kształt i rozmiar całej spoiny (im większa powierzchnia spoiny i bardziej nieregularny jej kształt, tym staje się ona mocniejsza).

Ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne, najczęściej używanym materiałem stanowiącym bazę klejów strukturalnych są żywice epoksydowe. Żywica epoksydowa zawiera grupy epoksydowe i jest zdolna do polireakcji (reakcji utwardzania). Grupa epoksydowa jest to trójczłonowy pierścień oksacyklopropanowy, złożony z dwóch atomów węgla i jednego atomu tlenu (rys. 11.2). Żywice epoksydowe mają zdolność do łączenia bardzo wielu materiałów w wyniku występowania adhezji właściwej oraz mechanicznej. Mają dobrą przyczepność do większości metali, tworzyw sztucznych, szkła czy ceramiki. W użyciu są także kleje na bazie żywic akrylowych.

11.2. KLEJE PRZEWODZĄCE ELEKTRYCZNIE

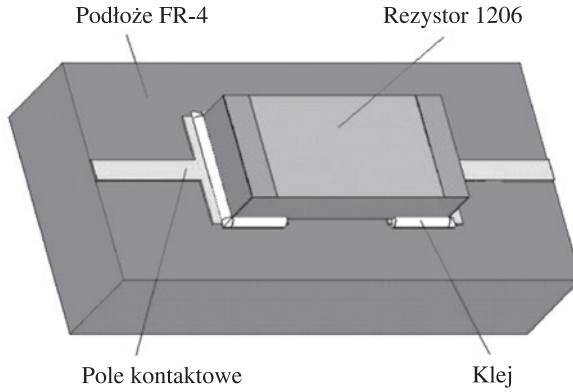
Jak wskazuje ich nazwa, kleje przewodzące elektrycznie (ang. *Electrically Conductive Adhesive*, ECA) charakteryzują się zdolnością do przewodzenia prądu elektrycznego. Zdolność tę uzyskuje się, wprowadzając cząstki przewodzące elektrycznie (wypełniacza) do polimerowej struktury kleju nazywanej osnową lub matrycą. Jeśli wypełniacza jest dostatecznie dużo w polimerowej osnowie, to powstają ścieżki przewodzące prąd elektryczny, na przykład pomiędzy polami kontaktowymi PCB i elementu (rys. 11.3). W takiej kompozycji kleju prąd może przepływać w dowolnym kierunku (izotropowo), zależnym od przyłożonych potencjałów, podobnie jak w połączeniach lutowanych. Izotropowy klej przewodzący oznacza się skrótem ICA (ang. *Izotropic Conductive Adhesive*).



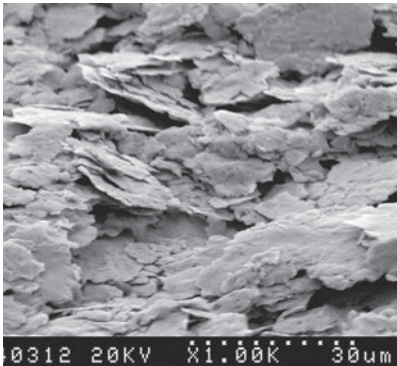
Rys. 11.3. Ścieżki prądowe w izotropowym kleju elektrycznie przewodzącym wg [34]

Izotropowe kleje przewodzące są coraz powszechniej stosowane na drugim poziomie powierzchniowego montażu elementów na płytkach obwodów drukowanych (rys. 11.4), zastępując lutowanie. Kleje te są budowane zwykle na bazie żywic epoksydowych. Wypełniaczem najczęściej jest srebro, zwykle w postaci proszku lub nieregularnych płat-

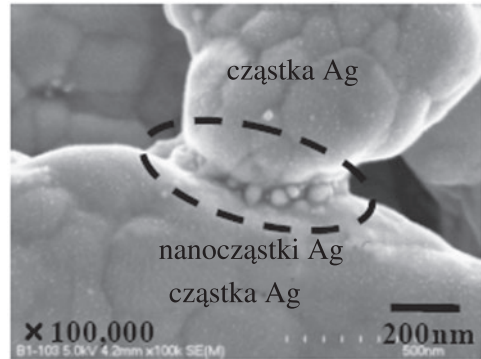
ków o wymiarach mikrometrowych (rys. 11.5). Podejmuje się też próby z zastosowaniem wypełniacza o innych rozmiarach i kształcie, aby poprawić właściwości elektryczne kleju. Na rysunku 11.6 pokazano miejsce kontaktu cząstek srebra o wymiarach mikrometrowych uzupełnione cząstkami nanometrowymi. Wypełniaczem mogą być także cząstki złota (ogra-



Rys. 11.4. ICA w montażu powierzchniowym [35]



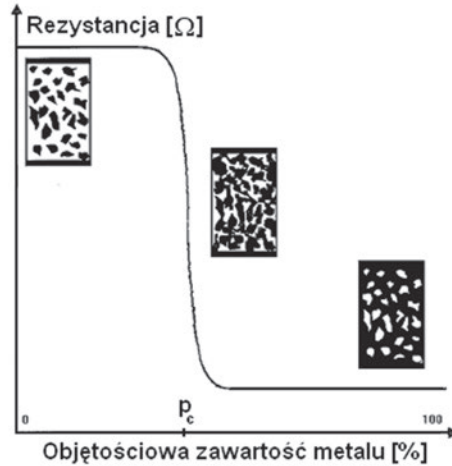
Rys. 11.5. Płatki srebra o rozmiarach mikrometrowych – typowy wypełniacz ICA [36]



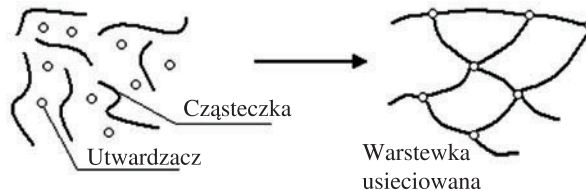
Rys. 11.6. Skupisko nanocząstek srebra pomiędzy dwoma cząstkami mikrometrowymi [37]

niczone zastosowanie ze względu na koszt), niklu, miedzi lub węgla. Srebro jest wyjątkowe spośród tych materiałów, ponieważ po utlenieniu jest także materiałem dobrze przewodzącym, w związku z czym elektryczne właściwości klejów nie zmieniają się w czasie starzenia. Stwierdzono bowiem ponad wszelką wątpliwość, że o całkowitym przewodnictwie łączy decyduje rezystancja materiału wypełniacza i rezystancja kontaktów między cząstkami wypełniacza, natomiast przewodność materiału osnowy nie odgrywa żadnej roli. Ponieważ materiał pól kontaktowych ma także wpływ na oporność wypadkową, zazwyczaj powłoki kontaktowe płytek obwodów drukowanych wykonuje się ze złota.

Warunkiem koniecznym przepływu prądu jest dostatecznie duża zawartość wypełniacza, umożliwiająca powstanie przestrzennej sieci kontaktów elektrycznych. Zawartość ta, przy której gwałtownie maleje wartość rezystancji właściwej kleju, nazywa się progiem perkolacyjnym (rys. 11.7). Ilość wypełniacza w ICA dostępna w handlu zazwyczaj znacznie przewyższa wartość progową, co gwarantuje odpowiednie przewodnictwo nawet przy dużych rozrzutach zawartości wypełniacza w procesie produkcyjnym.



Rys. 11.7. Zależność rezystancji ICA od zawartości wypełniacza [38]



Rys. 11.8. Sieciowanie polimerów w obecności utwardzacza [39]

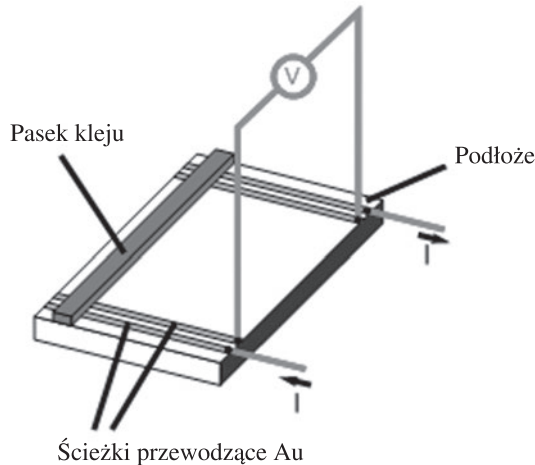
Ze względu na skład chemiczny i wewnętrzne wiązania kleje można podzielić na termoutwardzalne, termoplastyczne, elastomerowe, a także ich mieszaniny. Kleje termoutwardzalne utwardzają się, czyli nabierają ostatecznych właściwości, wskutek reakcji chemicznych prowadzących do przestrzennego usieciowania polimeru (rys. 11.8). Struktura ta jest trwała i nieodwracalna w temperaturach poniżej temperatury zeszklenia. Kleje te są dostępne w postaci kompozycji jedno- lub dwuskładnikowych. Na ogół kompozycje jednoskładnikowe wymagają wyższej temperatury utwardzania niż kompozycje dwuskładnikowe. Te ostatnie mogą się utwardzać nawet w temperaturze pokojowej, ale, aby uzyskać wymagane właściwości połączeń, składniki muszą być mieszane w ściśle

określonych proporcjach bezpośrednio przed użyciem kleju. Termoutwardzalne kleje jednoskładnikowe znalazły najszersze zastosowanie w montażu elektronicznym.

Kleje termoplastyczne są kompozycjami jednoskładnikowymi, które nie tworzą usieciowanych łańcuchów polimerowych i mogą być wielokrotnie zmiękczone przez podgrzanie, co umożliwia naprawę połączeń. Przykładem takich kompozycji są kleje poliestrowe, poliwinylowe, akrylowe czy poliamidowe.

Kleje elastomerowe mogą ulegać znacznym odkształceniom bez uszkodzenia połączenia. Są one produkowane na bazie żywic syntetycznych, takich jak polimery uretanowe i silikonowe oraz naturalny kauczuk i guma neoprenowa.

Na specjalną uwagę zasługują materiały, które nie zawierają wypełniacza i samoistnie przewodzą elektrycznie polimery. Charakteryzują się one wielokrotnymi, podwójnymi i potrójnymi wiązaniami o rozbudowanej strukturze przypominającej grafit. Niestety polimery te są bardzo podatne na utlenianie, kruche i trudne w użyciu. Być może usunięcie w przyszłości tych wad pozwoli na ich zastosowanie w montażu aparatury elektronicznej.



Rys. 11.9. Metoda pomiaru rezystancji paska kleju [40]

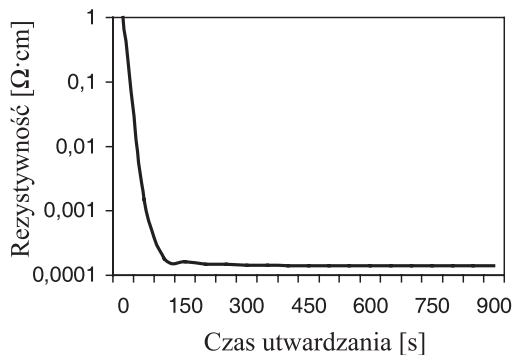
Podstawową cechą kleju elektrycznie przewodzącego jest jego rezystywność (opór właściwy). Rezystywność ρ jest rezystancją R paska kleju o jednostkowym polu przekroju poprzecznego S i jednostkowej długości l , opisaną zależnością

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Rezystancję R niezbędną do obliczenia rezystywności mierzy się zwykle metodą czteropunktową (rys. 11.9). Wymagania, jakie powinny spełniać ICA w montażu powierzchniowym, określone są na maksymalnym poziomie wartości rezystywności $5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. Dąży się do stworzenia kompozycji klejowych o mniejszej wartości rezystywności, a ce-

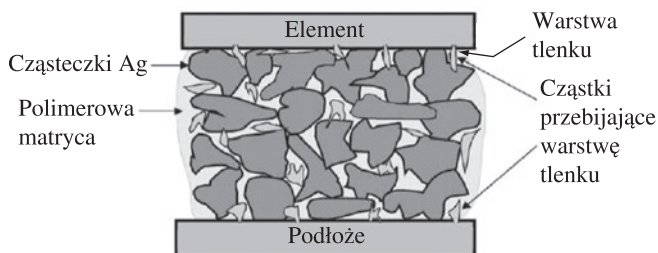
lem może być wartość ρ bezołowiowych stopów lutowniczych, mierzona na poziomie $1,2 \div 1,6 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$.

Klej izotropowy osiąga pełną przewodność podczas utwardzania głównie wskutek poprawiającego się kontaktu między cząstkami srebra, spowodowanego skurczem osnowy polimerowej. Zmiana rezystywności jest znaczna, co pokazano na rysunku 11.10. Dlatego też stosowanie dodatków powodujących zwiększenie skurczu żywicy podczas utwardzania może być kolejną metodą poprawy przewodności kleju. Przewodność klejów można też poprawić stosując wypełniacze z przejściową fazą ciekłą lub ze stopów o niskiej temperaturze topnienia. Stopy te topią się podczas utwardzania kleju i tworzą wewnętrzne połączenia metaliczne pomiędzy płatkami srebra i powłoką pól kontaktowych.



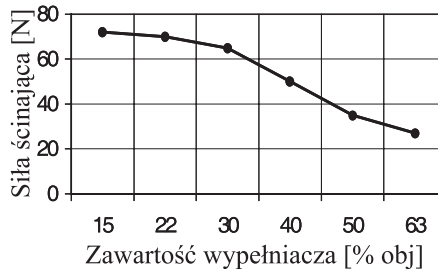
Rys. 11.10. Zmiana rezystywności kleju w miarę utwardzenia matrycy polimerowej [41]

Jeśli pola kontaktowe wykonane są z metali szlachetnych, rezystancja styku pomiędzy klejem a powłoką pola kontaktowego jest stosunkowo stabilna. Przy innych powłokach kontaktowych rezystancja ta radykalnie wzrasta podczas starzenia w podwyższonej temperaturze i wilgotności. Aby uniknąć zwiększenia rezystancji styku, stosowane są różne dodatki do kleju, np. cząstki o dużej twardości i ostrych krawędziach, które przy skurczu matrycy polimerowej przebijają utlenioną powierzchnię kontaktów, tworząc stabilne połączenia (rys. 11.11).



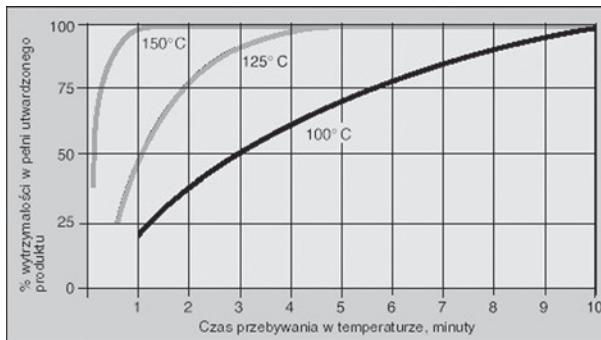
Rys. 11.11. Cząstki o ostrych krawędziach przebijające utlenioną warstwę powierzchniową kontaktów wg [34]

Naturalnym sposobem poprawy przewodności elektrycznej kleju wydaje się być zwiększanie zawartości wypełniacza. Jednak po przekroczeniu progu perkolacyjnego rezystywność kleju praktycznie nie ulega zmniejszeniu. Ulegają natomiast pogorszeniu właściwości mechaniczne połączenia. Na rysunku 11.12 pokazano zależność siły ścinającej połączenia od objętościowej zawartości wypełniacza. Wypełniacza powinno być zatem na tyle dużo, aby mieć pewność, że został przekroczony próg perkolacyjny i na tyle mało, aby zbyt nie została osłabiona wytrzymałość połączenia.



Rys. 11.12. Wpływ zawartości wypełniacza na wytrzymałość złącza klejowego [42]

Jak wspomniano wcześniej, kleje elektrycznie przewodzące mogą zastępować stopy lutownicze w montażu powierzchniowym. Prace nad wprowadzeniem ECA do montażu elektronicznego zostały zintensyfikowane z chwilą, gdy pojawiła się perspektywa wprowadzenia zakazu stosowaniu ołowiu. Ten sposób montażu uważany jest za alternatywny w stosunku do stosowania lutów bezołowiowych.



Rys. 11.13. Zależność temperatury i czasu utwardzania ICA wg [32]

Kleje przewodzące elektrycznie w porównaniu do lutów cechują się między innymi następującymi zaletami:

- Utwardzają się w niższych temperaturach niż proces lutowania, co znacznie zmniejsza szok temperaturowy łączonych elementów i naprężenia mechaniczne.

Temperatura utwardzania dodatkowo może być obniżana poprzez wydłużanie czasu utwardzania (rys. 11.13),

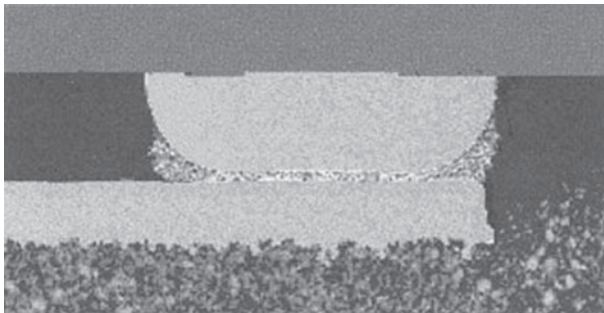
- Cechują się dobrą zdolnością zwilżania i łączenia materiałów innych niż metalowe. Dzięki temu za pomocą klejów można wykonywać bezpośrednie złącza elektryczne do takich materiałów, jak: naporowane przewodzące warstwy tlenkowe, kompozyty tlenków metali, tworzywa sztuczne, a także do elementów z piezoceramiki.
- Pozwalają na większą gęstość upakowania. Kleje w procesie utwardzania nie zmieniają wielkości powierzchni kontaktu z podłożem (ciekłe lutownia rozplývają się po polach kontaktowych).
- Nie rozpuszczają srebra z pól kontaktowych i powłok złota ze ścieżek przewodzących.
- Nie wymagają stosowania topników, a w konsekwencji stosowania operacji mycia.
- Charakteryzują się dużą wytrzymałością zmęczeniową i wykazują odporność na cykliczne zmiany temperatury.
- Grubość warstwy kleju może być kilkakrotnie mniejsza od warstwy lutu pomiędzy łączonymi powierzchniami, co powoduje, że połączenia klejowe mogą być bardziej ekonomiczne niż połączenia lutowane.

Kleje przewodzące w porównaniu do lutów bezołowiowych mają też wady, takie jak:

- gorsza przewodność elektryczna i zdecydowanie gorsza przewodność cieplna,
- mniejsza wytrzymałość na ścinanie,
- brak możliwości wymiany elementów łączonych za pomocą klejów termoutwardzalnych,
- wymagane niskie temperatury przechowywania i ograniczony czas użycia klejów,
- brak efektu „samopozycjonowania” elementów przy niedokładnym ułożeniu.

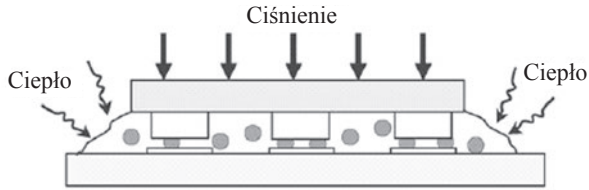
Ponadto pozostałości kleju na narzędziach do dozowania i drukowania polimeryzują i są ciężko usuwalne. W celu usunięcia resztek kleju trzeba stosować specjalne rozpuszczalniki.

Kleje przewodzące elektrycznie produkowane są zazwyczaj w postaci past i muszą być nakładane selektywnie na pola kontaktowe płytek obwodów drukowanych. Mogą być także stosowane do łączenia kontaktów podwyższonych w montażu flip chip (rys. 11.14), co wymaga wysokiej rozdzielczości selektywnego dozowania na poziomie wielkości po-

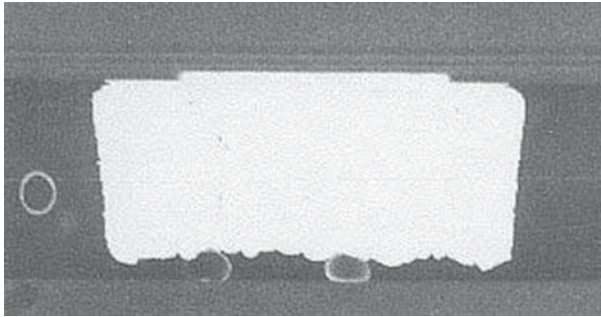


Rys. 11.14. ICA w montażu flip chip [4]

dzięki rozstawu kontaktów podwyższonych. Z tego względu w montażu flip chip stosuje się głównie kleje anizotropowe (ang. *Anisotropic Conductive Adhesive, ACA*).



Rys. 11.15. ACA w montażu flip chip [4]



Rys. 11.16. Kontakt elektryczny po zastosowaniu ACA w montażu flip chip [4]



Rys. 11.17. Podstawowe grupy ECA [41]

Kleje przewodzące anizotropowo charakteryzują się tym, że przewodnictwo elektryczne zachodzi tylko w jednym kierunku – między obwodem drukowanym i elementem. Kleje takie przygotowane są zwykle jako folia (ang. *Anisotropic Conductive Film*,

ACF) lub pasty (ang. *Anisotropic Conductive Paste*, ACP) o na tyle małej zawartości wypełniacza, że brak jest kontaktu elektrycznego pomiędzy poszczególnymi jego cząsteczkami. Po umieszczeniu kleju pomiędzy dwoma powierzchniami kontaktowymi i podgrzaniu, przy jednoczesnym docisku, uzyskuje się mikrokontakty cząstek wypełniacza z tymi powierzchniami (rys. 11.15). W kierunkach poprzecznych do przyłożonej siły docisku cząstki w dalszym ciągu są izolowane materiałem matrycy polimerowej. Przepływ prądu elektrycznego zapewnia pojedyncza warstwa cząstek wypełniacza (rys. 11.16). Z tego względu cząstki te powinny mieć kształt sferyczny o identycznych wymiarach i dodatkowo łatwo ulegać odkształceniom przy docisku (co omówiono w rozdziale 4).

Niewątpliwą zaletą stosowania w montażu elektronicznym klejów przewodzących elektrycznie jest możliwość szerokiego doboru ich składników w zależności od warunków pracy złącza. To nie tylko rodzaj osnowy, materiał i kształt cząstek wypełniacza, oraz proporcje objętościowe składników decydują o właściwościach klejów i ich zastosowaniu, ale także zastosowane dodatki, takie jak utwardzacze, promotory adhezji, środki uelastyczniające, rozcieńczalniki itp. Zróżnicowanie klejów przewodzących elektrycznie, w którym wyodrębniono podstawowe grupy ECA, pokazano na rys. 11.17.

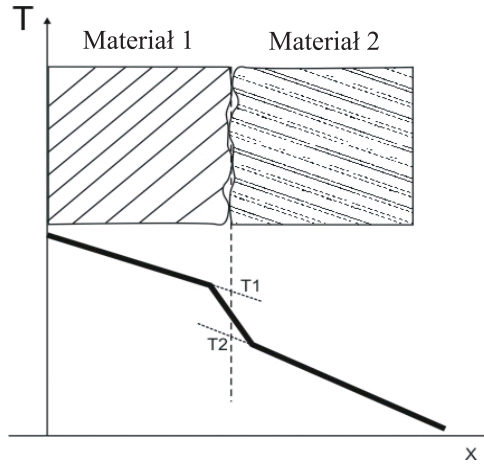
11.3. KLEJE PRZEWODZĄCE CIEPLNIE

Dążenie do zwiększenia skali integracji układów przy jednoczesnym zwiększeniu częstotliwości pracy urządzeń elektronicznych powoduje znaczny wzrost wydzielanej mocy z powierzchni lub objętości jednostkowej. Wydajne odprowadzenie ciepła i jego rozpraszanie stanowią podstawowy problem współczesnej elektroniki (rozd. 13), wzrost temperatury bowiem struktur półprzewodnikowych i innych elementów, może być głównym czynnikiem wpływającym na pogorszenie niezawodności urządzeń elektronicznych.

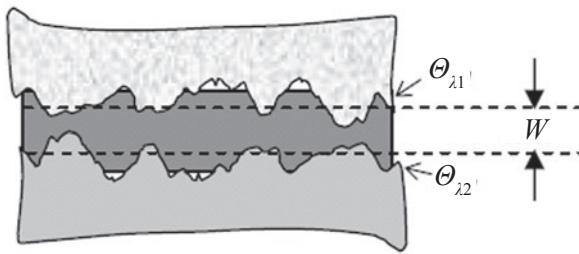
Przekazywanie ciepła może odbywać się drogą konwekcji (unoszenia), radiacji (promieniowania elektromagnetycznego) lub kondukcji cieplnej (przewodzenia). Jednym z podstawowych zadań montażu elektronicznego jest odprowadzanie ciepła drogą przewodzenia. To sposób przekazywania energii cieplnej między sąsiadującymi powierzchniami ciał stałych. Niestety, na styku materiałów transport ciepła jest utrudniony, ze względu na to, że powierzchnie materiałów są chropowate i w przewodzeniu biorą udział wyłącznie te nieliczne fragmenty powierzchni, które stykają się ze sobą. W efekcie w tym miejscu występuje skokowy spadek temperatury (rys. 11.18) spowodowany ograniczeniem przewodności cieplnej, czyli dużą rezystancją termiczną.

W celu ograniczenia rezystancji termicznej styku stosuje się materiały pośrednie, ułatwiające transport ciepła (ang. *Thermal Interface Materials*, TIM). Pokazana na rysunku 11.19 warstwa pośrednia TIM wprowadza wprawdzie dwie rezystancje styku oznaczone jako $\Theta_{\lambda 1}$ i $\Theta_{\lambda 2}$, ale ich sumaryczna wartość zazwyczaj jest wielokrotnie mniejsza od oporności cieplnej występującej między materiałami bez obecności warstwy pośredniej.

W montażu elektronicznym połączenia lutowane zwykle dobrze przewodzą ciepło, a lut jest traktowany jako bardzo dobry TIM. Oczywiście nie wszystkie powierzchnie mo-



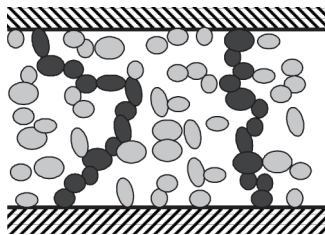
Rys. 11.18. Wpływ styku materiałów na przewodzenie ciepła [41]



Rys. 11.19. Warstwa pośrednia W materiału termicznie przewodzącego (TIM) wg [43]

gą być lutowane i z tego względu coraz częściej stosuje się kleje przewodzące ciepłnie (ang. *Thermally Conductive Adhesives*, TCA). Kleje są także bardziej elastyczne od stopów lutowniczych, dlatego często wykorzystuje się je do absorpcji naprężeń termicznych w układach niedopasowanych pod względem współczynnika rozszerzalności cieplnej.

Kleje przewodzące ciepłnie, podobnie jak przewodzące elektrycznie, składają się głównie z fazy ciągłej polimerowego materiału bazowego, zwanego osnową (matrycą), oraz z fazy dyspersyjnej przewodzącego wypełniacza. Rodzaj osnowy, materiał i kształt cząstek wypełniacza, oraz proporcje objętościowe składników decydują o właściwościach klejów i ich zastosowaniu. Podobnie jak przy transporcie prądu w ECA, transport ciepła w TCA możliwy jest po przekroczeniu progu perkolacyjnego (rys. 11.7). Wprawdzie ciepło jest transportowane także przez polimerową osnowę, ale przewodność termiczna λ polimerów jest około 2000 razy mniejsza od przewodności typowych materiałów wypełniaczy (srebro, miedź) i dopiero utworzenie łańcuchów stykających się ze sobą cząstek wypełniacza warunkuje przepływ ciepła (rys. 11.20).



Rys. 11.20. Formowanie cząstek umożliwiających transport ciepła [44]

Teoretycznie, efektywność transportu ciepła jest zależna od przewodności cieplnej materiału wypełniacza i termicznej rezystancji styku pomiędzy cząstkami wypełniacza. Rezystancję termiczną można przedstawiać analogicznie do rezystancji elektrycznej definiowanej prawem Ohma, gdzie zamiast różnicy potencjałów wprowadza się różnicę temperatur, a zamiast prądu – strumień ciepła. Ta analogia pozwala przedstawić rezystancję termiczną jako

$$\Theta_{\lambda} = \frac{l}{\lambda A},$$

gdzie Θ_{λ} jest rezystancją termiczną przewodnika, [K/W], l jego długością [m], λ – przewodnością termiczną (współczynnikiem przewodzenia ciepła), [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], natomiast A jest porzecznym przekrojem przewodnika [m^2].

Rezystancja termiczna pojedynczego łańcucha cząstek, przedstawionego na rys. 11.20, wynosi

$$\Theta_P = \Theta_{\lambda_1} + \Theta_{\lambda_2} + \dots + \Theta_{\lambda_n} + \Theta_{TC1} + \Theta_{TC2} + \dots + \Theta_{TC(n-1)},$$

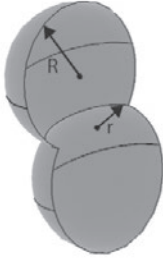
gdzie Θ_{λ} jest rezystancją termiczną cząstki wypełniacza, a Θ_{TC} – rezystancją termiczną styku między cząstkami.

Najważniejsze w transporcie ciepła są rezystancje termiczne styku Θ_{TC} . Przy cząstkach o mikrometrowych rozmiarach powierzchnia styku (przekrój poprzeczny przewodnika A) jest bardzo mała i przy łańcuchu wielu cząstek efektywność transportu ciepła nie jest duża. W efekcie, przy stosowaniu materiałów wypełniacza o bardzo dużych wartościach współczynnika przewodzenia ciepła (srebro, $\lambda = 429 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, miedź, $\lambda = 401 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), przewodność kompozytu polimerowego nie przekracza wartości kilku $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

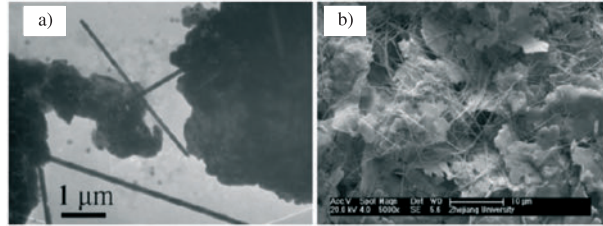
Z tego względu w wielu laboratoriach podejmowane są prace nad zwiększeniem przewodności cieplnej. Badania są prowadzone w następujących kierunkach:

- Modyfikacje osnowy polimerowej w celu zwiększenia jej kurczliwości w procesie utwardzania i w efekcie deformacji cząstek wypełniacza do zwiększenia powierzchni ich styku. Modelując powierzchnię styku cząstek kulistych (rys. 11.21), wykazano, że zwiększenie tego styku z $r/R = 0,2$ do $0,5$ skutkuje niemal dwukrotnym zmniejszeniem się rezystancji styku.

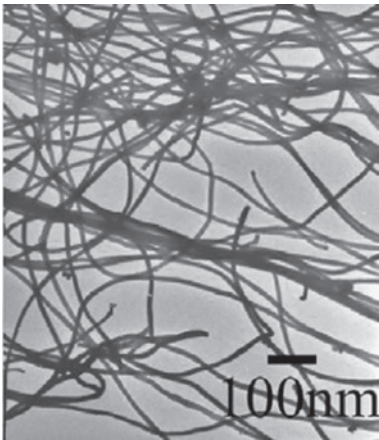
– Dodawanie do mikrometrowych cząstek wypełniacza cząstek o wymiarach nanometrowych dla zrównoleżenia kontaktów, a przez to zwiększenia przepływu ciepła. Skutek dodania nanocząstek srebra pokazano na rys. 11.6, a nanodrutów Ag – na rys. 11.22.



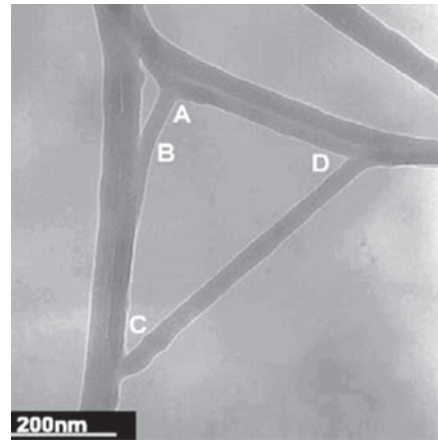
Rys. 11.21. Model kontaktu o średnicy r cząstek kulistych o średnicy R [45]



Rys. 11.22. Obrazy mikroskopu transmisyjnego (a) i skaningowego (b) ukazujące lokalne połączenia uzyskane wskutek dodania nanodruków Ag do płatków srebra o wymiarach mikrometrowych [46]



Rys. 11.23. Powlekanie srebrem CNT rozproszone w żywicy epoksydowej [47]



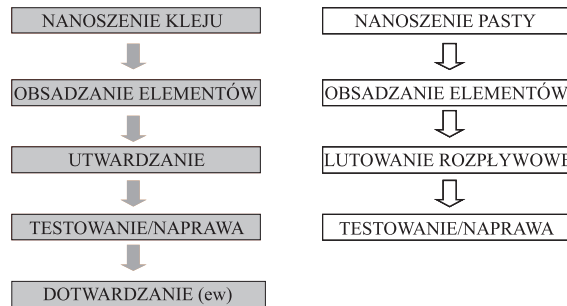
Rys. 11.24. Tworzenie „siec przestrzennych” CNT dla lepszego transportu ciepła [48]

– Stosowanie jako wypełniaczy alotropowych odmian węgla o bardzo dużych wartościach współczynnika przewodzenia ciepła. Duże nadzieje wiąże się z użyciem nanorurek węglowych (CNT), których obliczona wartość λ może przekraczać $6000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Podstawowa trudność w formowaniu kompozytów z CNT wynika z ograniczonej zawartości tego wypełniacza i braku stałych kontaktów między poszczególnymi rurkami dla tworzenia łańcucha perkolacyjnego. Dlatego podejmuje się próby modyfikacji ich powierzchni, na przykład przez powlekanie warstwą srebra (rys. 11.23) lub tworzenie „siec przestrzennych” nanorurek węglowych (rys. 11.24).

11.4. SPOSOBY DOZOWANIA KLEJU

Kleje przewodzące termiczne, używane jako TIM, a także niektóre kleje strukturalne, nakładane są na łączone powierzchnie w sposób zależny od wielkości tych powierzchni i celu, jaki mają spełniać. Znacznie więcej uwagi zwraca się na sposób dozowania kleju strukturalnego mocującego elementy SMD przed lutowaniem na fali czy też kleju elektrycznie przewodzącego w montażu powierzchniowym. Wymaga to bowiem nałożenia ściśle określonej objętości kleju dokładnie na przeznaczone do tego miejsca (np. rys. 8.13).

W montażu powierzchniowym ECA może być nakładany podobnie jak pasta lutownicza – przez szablon. Także i inne etapy procesu technologicznego są podobne jak w łączeniu elementów lutami (rys. 11.25), z tym że zamiast lutowania rozpliwowego (o wymaganym profilu temperaturowym – rys. 8.37) stosuje się utwardzanie osnowy polimerowej zwykle w niższej temperaturze i w dłuższym czasie (rys. 11.13).

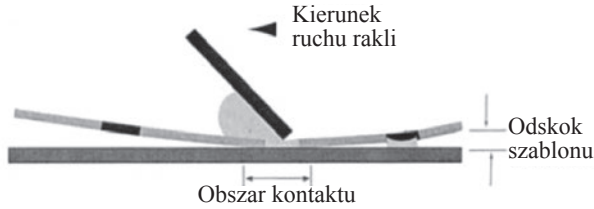


Rys. 11.25. Montaż powierzchniowy – podobieństwa w procesach klejenia i lutowania [41]

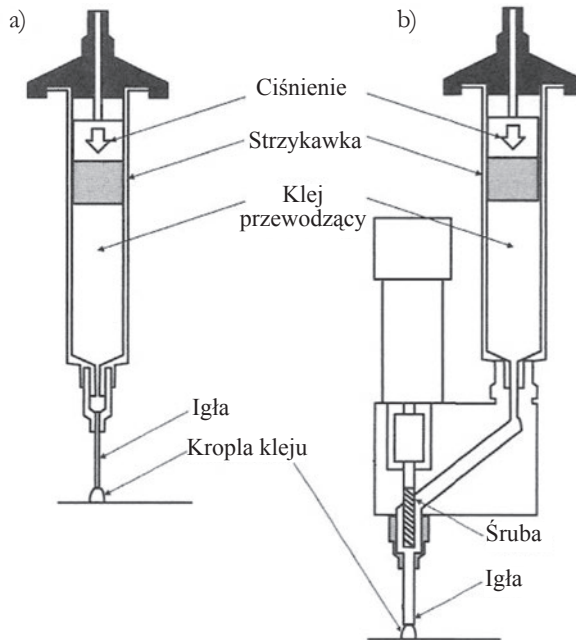
Do nakładania kleju stosuje się szablony ze stali nierdzewnej lub polimerowe. Druk szablonowy polega na przecięnięciu kleju przez szablon z użyciem rakli. Szablon przymocowany jest za pomocą metalowej siatki do aluminiowej ramy. Siatka powoduje, że szablon zawieszony tuż nad płytką drukowaną utrzymywany jest w stanie napięcia i dopiero na skutek docisku rakli dotyka podłoża (rys. 11.26). Po naniesieniu kleju na wybrane pola szablon jest oddzielany od płytki, a klej, dzięki swoim właściwościom tiksotropowym, pozostaje w miejscu, w którym został nałożony. Coraz szersze zastosowanie znajdują szablony polimerowe. Mała adhezja klejów do polimeru ułatwia przechodzenie kleju przez otwory szablonu, a dzięki dużej elastyczności szablony te lepiej przylegają do podłoża.

Kleje mogą być także dozowane strzykawką, a częściej zespołem strzykawek. Zasada procesu polega na nałożeniu określonej objętości kleju przez dobranie odpowiedniej średnicy strzykawki i regulację wyciśniętej pulsacyjnie objętości kleju. Objętość kleju może być zmieniana w zależności od typu podzespołu i dozowana przez zmianę czasu i ciśnienia impulsu powietrza stosowanego do wyciśnięcia kleju. Innym sposobem uzyskania po-

wtarzalności dozowań jest system ze stałym ciśnieniem i regulowaną liczbą obrotów śruby wyciskającej określoną objętość kleju. Systemy te pokazano na rys. 11.27.



Rys. 11.26. Druk szablonowy kleju [4]

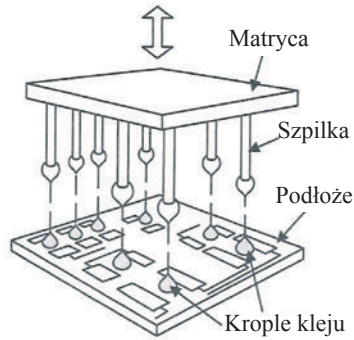


Rys. 11.27. Nanoszenie kleju za pomocą dozownika:
a) przez zmianę ciśnienia i czasu, b) przez regulację ciśnienia i obrót śruby wg [16]

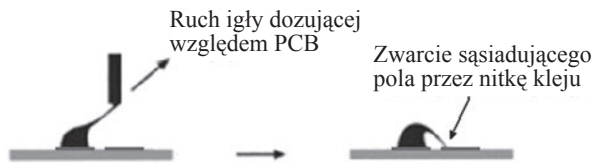
Druk za pomocą szpilek transferowej (ang. *pin-transfer*) polega na tym, że wykorzystuje się łożę ze szpilekmi skierowanymi w dół, których średnica i kształt końcówki decydują o pobieranej ilości kleju. Końcówki szpilek są zanurzone w pojemniku z klejem, a następnie unoszone, przenoszone nad płytkę drukowaną i obniżane do momentu zetknięcia się z nią. Z chwilą uniesienia szpilek, klej pozostaje na płytce lub polach mozaiki przewodzącej (rys. 11.28).

Jednym z najważniejszych problemów związanych z nanoszeniem kleju strzykawką lub igłami transferowymi jest tworzenie się ciągnących nitek. Przyczyną tego jest zbyt du-

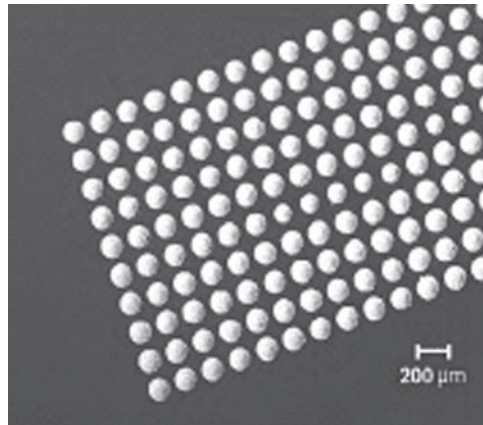
za szybkość ruchu igły dozującej i spiczasty kształt kropli kleju związany z jego właściwościami reologicznymi. Ciągająca się nitka kleju przewodzącego po oderwaniu od igły może opaść na sąsiednie pole kontaktowe powodując zwarcie (rys. 11.29).



Rys. 11.28. Druk za pomocą szpili transferowej – nanoszenie kleju strukturalnego [16]



Rys. 11.29. Możliwość zwarć spowodowanych nitką kleju wg [32]



Rys. 11.30. Matryca kontaktów klejowych do montażu flip chip [49]

Podejmuje się próby tworzenia matryc kontaktów klejowych w montażu flip chip. Jest to możliwe w technologii drukowania strumieniowego (*Ink-jet*) z stosowaniem klejów

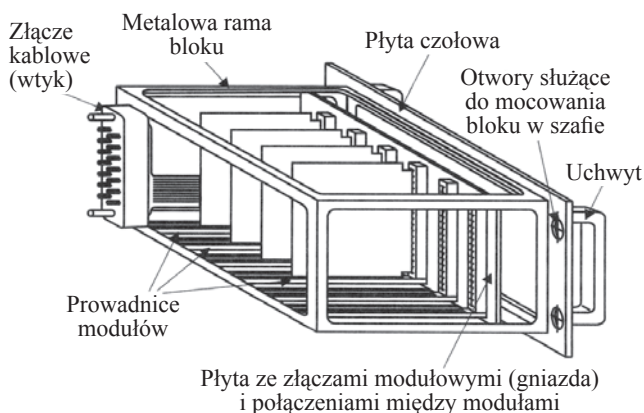
przewodzących elektrycznie (rys. 11.30). Wprowadzenie tej technologii do produkcji wymaga rozwiązania wielu problemów zmierzających do:

- zapewnienia lepkości kleju poniżej 100 mPa, co jest w sprzeczności z gęstymi formułami ECA o dużej zawartości wypełniacza,
- uniknięcia sedymentacji cząstek wypełniacza, co jest naturalne w kompozytach o małej lepkości,
- zapewnienia bardzo wąskiego rozkładu wymiarowego cząstek wypełniacza, w celu uniknięcia zablokowania dyszy dozującej,
- wieloetapowego utwardzania kleju, tak aby po nadrukowaniu i pierwszym procesie termicznym (wysuszenie, utworzenie stabilnych kształtów kontaktów) właściwości adhezyjne kleju zostały zachowane do ostatecznego utwardzania w procesie montażu.

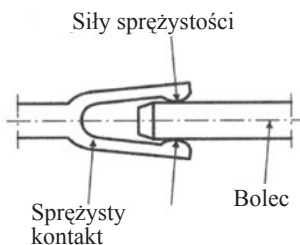
12. POŁĄCZENIA I ZŁĄCZA

12.1. POŁĄCZENIA ROZŁĄCZNE

Według klasyfikacji podanej w rozdziale 2, na trzecim poziomie montażu z płytek obwodów drukowanych, gotowych mikrosystemów i innych podzespołów tworzy się kompletne urządzenia elektroniczne w formie np. bloku. Przykład panelowej konstrukcji takiego bloku pokazano na rys. 12.1. Zasadniczą rolę odgrywają tu połączenia rozłączne



Rys. 12.1. Panelowa (szufladowa) konstrukcja bloku [16]



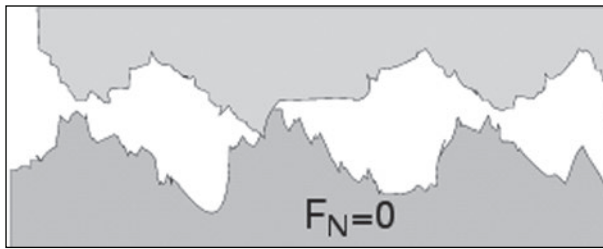
Rys. 12.2. Idea połączenia rozłącznego [16]

(w literaturze nazywane też połączeniami rozłączalnymi). Połączenia takie charakteryzują się tym, że łączone części można wielokrotnie rozłączać i łączyć ponownie bez obawy ich zniszczenia. Jak widać na rysunku, płytki obwodów drukowanych mocowane są mechanicznie w szynach prowadzących, a kontakt elektryczny możliwy jest poprzez zastosowanie złączy. Oczywiście zaprezentowane rozwiązanie jest tylko przykładem i aktual-

nie stosowane urządzenia mogą znacznie różnić się konstrukcyjnie, jednak regułą jest stosowanie połączeń rozłącznych. Istotnym elementem złącza jest para kontaktów (gniazdo i wtyk), która umożliwi przepływ prądu elektrycznego w wyniku odkształcenia sprężystego przynajmniej jednego z tych kontaktów i oddziaływania sił sprężystości (rys. 12.2). Do spełnienia takiego zadania używane są materiały sprężyste (np. brąz fosforowy lub berylowy) pokryte np. złotem, które zapobiega korozji styków, zmniejsza siłę tarcia przy rozłączaniu połączenia i jest materiałem o małej rezystancji właściwej. Rezystancja połączenia R determinująca straty w przekazywaniu energii jest najbardziej istotnym parametrem połączenia elektrycznego. Rezystancja ta jest sumą rezystancji metali elementów gniazda i wtyku (R_m), rezystancji pokryw i zanieczyszczeń warstw kontaktowych (R_k) oraz rezystancji przewężenia (R_p):

$$R = R_m + R_k + R_p.$$

Dobierając właściwe metale i pokrycia, można ograniczać rezystancje R_m i R_k , natomiast rezystancja przewężenia jest związana z chropowatością oraz odkształceniem



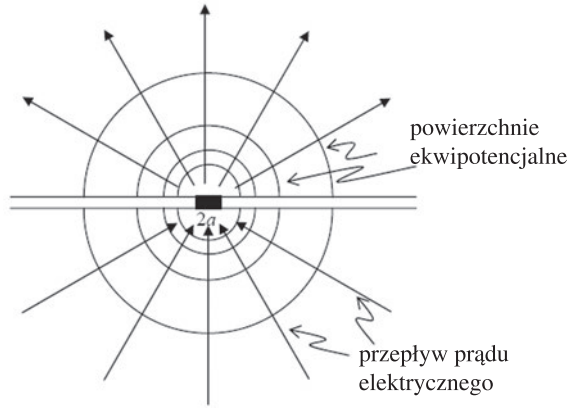
Rys. 12.3. Kontakt pomiędzy powierzchniami bez docisku

łączonych elementów i może decydować o efektywności połączenia elektrycznego. Teoretycznie, jeśli metale kontaktów są nieograniczenie twarde, to bez względu na siłę docisku styk powierzchni może nastąpić jedynie w trzech punktach. Stosowane w praktyce materiały podlegają odkształceniom, ale bez docisku – siły F_N prostopadłej do powierzchni styku kontakt jest bardzo ograniczony (rys. 12.3). Dla powierzchni metalowych o rezystywności ρ , rezystancję takiego przewężenia o promieniu a określa zależność

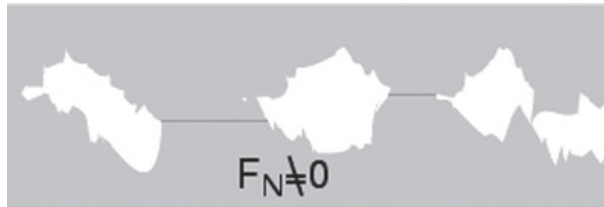
$$R_p = \frac{\rho}{2a},$$

a rozkład powierzchni ekwipotencjalnych przedstawiono na rysunku 12.4.

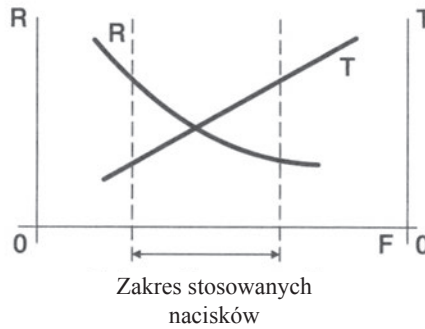
Siła oddziałująca prostopadle do powierzchni tworzących kontakt powoduje ograniczone odkształcenie materiału, co prowadzi do zwiększenia ilości i obszarów kontaktów (rys. 12.5). W miarę wzrostu siły F_N maleje rezystancja połączenia R , ale jednocześnie wzrasta siła tarcia, którą należy pokonać, aby połączyć lub rozłączyć elementy. Zależności te pokazano na rysunku 12.6.



Rys. 12.4. Przeptyw prądu elektrycznego przez kontakt między dwiema powierzchniami wg [50]



Rys. 12.5. Obszary kontaktu między powierzchniami przy stosowaniu siły dociskającej

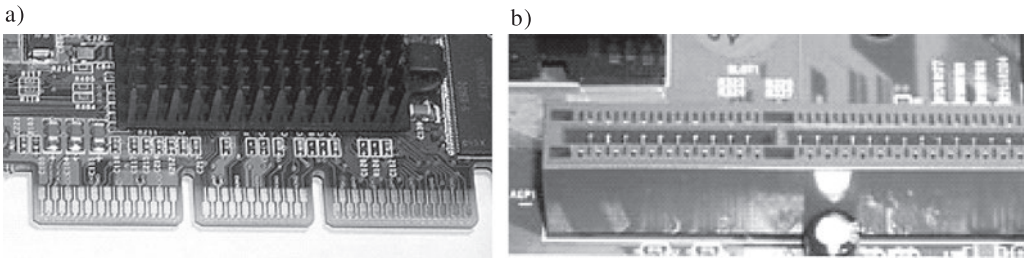


Rys. 12.6. Zależność rezystancji połączenia R i siły tarcia T połączenia rozłącznego od siły nacisku [16]

W połączeniach płytki obwodu drukowanego z gniazdem bloku (rys. 12.1) stosowane są złącza bezpośrednie lub pośrednie. W złączu bezpośrednim, nazywanym krawędziowym, rolę wtyku spełnia krawędź płytki, a kontaktami są odpowiednio przygotowane do tego celu pola obwodu drukowanego. Fragment płytki z takim złączem pokazano na ry-

sunku 12.7a. Gniazdo (z elementami sprężynującymi) jest dostosowane do grubości płytki, przy czym może zawierać jeden rząd kontaktów lub dwa niezależnie – dla pól kontaktowych po obydwu stronach płytki. Złącze pośrednie zawiera dołączony do płytki wtyk (rys 12.7b). Rozwiązanie to stosuje się wówczas, gdy przewidywana jest częsta wymiana modułów, na przykład dla zmiany funkcji urządzenia.

Dążność do wprowadzania zunifikowanych systemów, umożliwiających wzajemną wymiennność elementów spowodowała, że aparatura elektroniczna (głównie profesjonalna) jest konstruowana w standardowych systemach wymiarowych. Stosowanie zunifikowanych wymiarowo konstrukcji ułatwia eksploatację urządzeń oraz umożliwia tworzenie jednoli-



Rys. 12.7. Fragmenty PCB ze złączem bezpośrednim, krawędziowym (a) i złączem pośrednim (b)

tych zestawów z modułów nabywanych u różnych wytwórców. Przykładem jest standard mechaniki 19-calowej. Bazową jednostką takiego systemu jest cal, a szerokość kaset montowanych w szafach wynosi oczywiście 19" (482,6 mm). Jednak miejsce dostępne do montażu modułów (PCB) wewnątrz kasety jest mniejsze i wynosi 16,8" (426,72 mm). Wszystkie wymiary pionowe w szafach są wielokrotnością podziałki 44,45 mm, czyli 1,75", a jednostka ta nosi nazwę 1U. Wymiary płytek obwodów drukowanych w tym systemie przedstawiono w tabeli 12.1. Najbardziej popularne z nich zaznaczono wytłuszczonym drukiem.

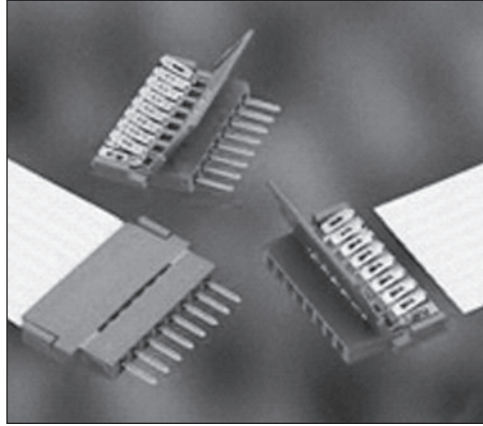
Tabela 12.1. Wymiary płytek obwodów drukowanych w standardzie 19"

Oznaczenia	Wysokość, mm	Długość, mm
3U	100	100 160 220 280
4U	144,45	100 160 220 280
4U	188,90	100 160 220 280
6U	233,35	100 160 220 280

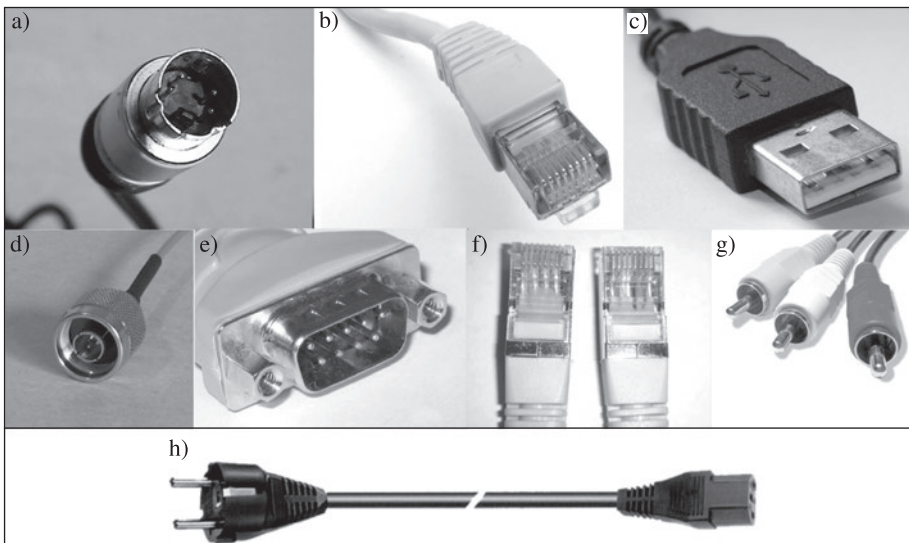
Oczywiście można też tworzyć PCB w pozostałych wymiarach, należy się jednak wówczas liczyć z tym, że ograniczy to liczbę dostępnych na rynku gotowych konstrukcji.

Płytką obwodu drukowanego może być łączona elektrycznie z innymi zespołami również z użyciem elastycznych, płaskich wiązek kablowych. W przykładzie pokazanym na rysunku 12.8 przewody kablowe są zakończone gniazdami lub wtykami, ale wtyk może

być także uformowany z samego kabla taśmowego. Przy takim rozwiązaniu po usunięciu izolacji, przewody miedziane pokrywa się metalami stykowymi.

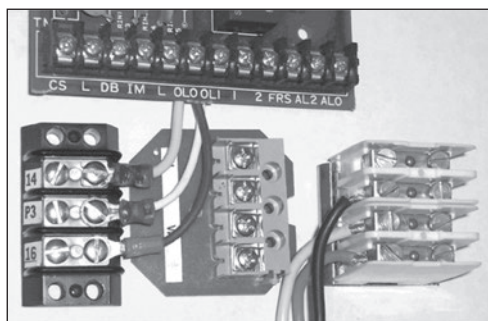


Rys. 12.8. Złącza i wtyki płaskich wiązek kablowych



Rys. 12.9. Elementy złączy kablowych; a) wtyk 4-pin Mini S-Video, b) wtyk 8P8C, c) wtyk USB, d) wtyk RF, e) wtyk DE-9, f) złącza ethernetowe, g) wtyki RCA, h) kabel zasilający IEC-320 C-13

Powszechnie złącza kablowe stosowane są do przesyłania sygnałów i rozprowadzania zasilania między blokami. Mają one bardzo zróżnicowane kształty i podanie pełnej oraz aktualnej systematyki byłoby niezwykle trudne. Z tego względu na rysunku 12.9 podano jedynie przykłady elementów złączy kablowych.



Rys. 12.10. Rozłączne połączenia zasilające z zastosowaniem wkrętów

Zasilanie energetyczne bloków może wymagać połączeń, w których końcówki montażowe pojedynczych kabli łączy się przy użyciu wkrętów. Połączenia takie pokazano na rysunku 12.10. Połączenie przedstawione na prawej części rysunku, gdzie pozbawione izolacji kable wprowadzono do specjalnych gniazd i dociśnięto wkrętami, nie jest zalecane. Kable powinny być zakończone końcówkami montażowymi lub przynajmniej pokryte metalem chroniącym przewód miedziany przed korozją – zwykle cynowane.

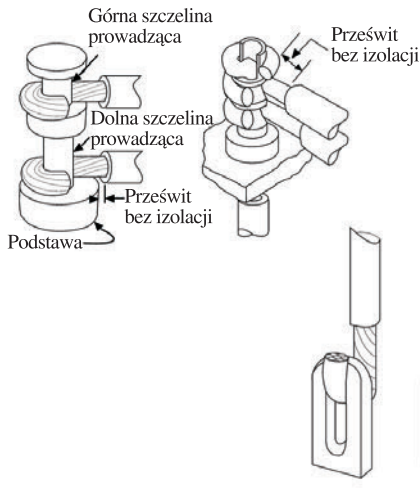
12.2. POŁĄCZENIA NIEROZŁĄCZNE

W połączeniach nierozłącznych złączone ze sobą części lub łączniki (dodatkowe elementy lub materiały łączące) ulegają uszkodzeniu przy rozłączeniu połączenia. Takim i połączeniami, omówionymi w poprzednich rozdziałach, są połączenia zgrzewane, lutowane i klejone.

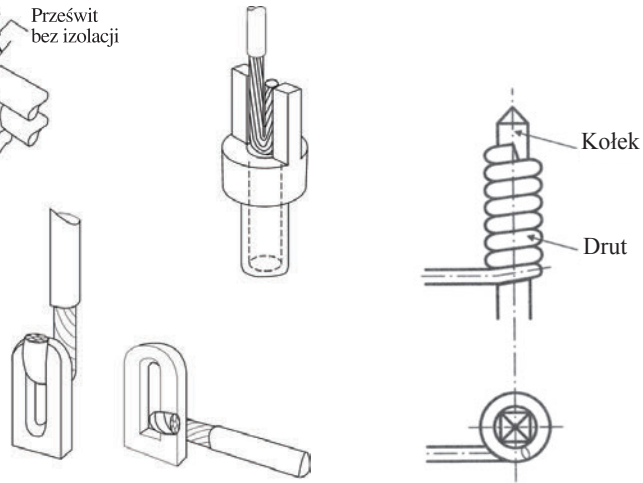
Przy połączeniach różnych elementów, np. drutów, elementów konstrukcyjnych, należy dążyć do tego, aby części były ze sobą połączone również kształtowo, a lut czy klej jedynie je unieruchamiały. Dlatego też końcówki przyłączeniowe są projektowane w sposób pozwalający na mechaniczne zakotwiczenie drutów przed lutowaniem. Zakotwiczenie uzyskuje się albo przez owinięcie przewodu drutowego dookoła stanowiska, wsuwając drut w szczelinę, albo przeprowadzając pętlę przez otwór. Przykłady pokazano na rysunku 12.11. Oczywiście przed lutowaniem odpowiednia część pokrycia izolacyjnego powinna zostać usunięta z przewodów. Zwykle do tego celu używa się specjalnych narzędzi, aby uniknąć nacięć lub innych uszkodzeń drutu lub pozostałej izolacji.

Połączenia owijane (ang. *Wire Wrap*) przeznaczone są do łączenia drutu z końcówką montażową w postaci kołka z ostrymi krawędziami (rys. 12.12) wykonanego z materiału o dużej sprężystości i dobrej przewodności elektrycznej (zwykle z brązu berylowego lub fosforowego). Drut bez izolacji za pomocą odpowiedniego narzędzia jest naciągany i kilkakrotnie (6–8 zwojów) owijany wokół końcówki (kołka), a naprężenia powstałe w trakcie procesu powodują, że drut trwale się zaciska i silnie przylega do kołka. Połączenia ta-

kie charakteryzują się małą intensywnością uszkodzeń i bardzo stabilną rezystancją (poniżej lub ok. $1 \text{ m}\Omega$) w czasie użytkowania.

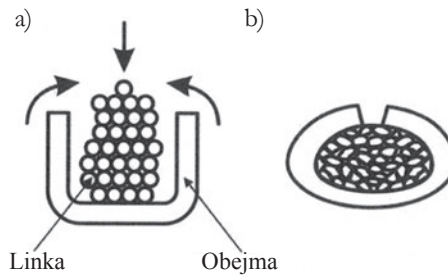


Rys. 12.11. Typowe sposoby dołączania drutu przed lutowaniem [23]



Rys. 12.12. Połączenie owijane [16]

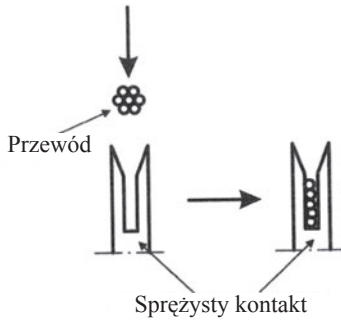
Tworzenie połączeń zaciskanych polega na zaciśnięciu na miękkim przewodzie (zwykle miedzianym) obejmy wykonanej z twardego materiału (mosiądzu, brązu berylowego). Do zaciskania używa się specjalnych narzędzi wprowadzających znaczne naprężenia powodujące odkształcenia plastyczne łączonych metali (rys. 12.13) i w efekcie powstaje złą-



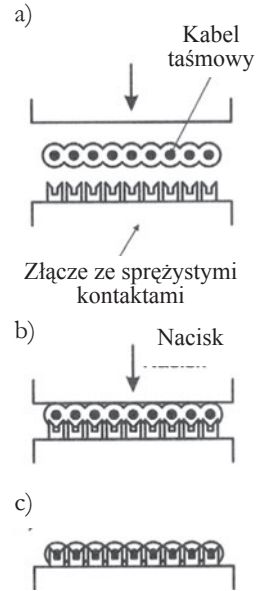
Rys. 12.13. Połączenie zaciskane; a) umieszczenie przewodu pozbawionego izolacji w obejmy, b) złącze po zaciśnięciu obejmy [16]

cze o małej i niezmienniej rezystancji, umożliwiające przewodzenie prądu o dużym natężeniu. Kształt złącza zależy od użytego narzędzia i może być płaski, kwadratowy, sześciokątny lub inny. Zwykle narzędzia zaciskające wykonują też poprzeczne karby na obejmach, co zwiększa wytrzymałość mechaniczną połączenia przy działaniu sił wzdłużnych.

W połączeniach zakleszczanych miękki przewód elektryczny wciskany jest w szczelną płaskiej, sprężystej końcówki i ulega deformacji zwiększając powierzchnię styku (rys. 12.14). Kontakt taki może być powielany, jeśli przewód zakleszczany jest w kilku, ustawionych w rzędzie, szczelinach.



Rys. 12.14. Zasada tworzenia połączenia zakleszczanego [16]



Rys. 12.15. Sposób wykonania połączenia zakleszczanego dla przyłączenia płaskiego kabla taśmowego [16]

Połączenia zakleszczane powszechnie stosowane są do łączenia płaskich wiązek kablowych (kablów taśmowych) z kontaktami złączy modułowych i kablowych. Kabel w izolacji (rys. 15a) wciskany jest w kontakty (rys. 15b), których ostre krawędzie nacinają izolację i zakleszczają przewody, doprowadzając do otrzymania wielu połączeń (rys. 15c) w jednej operacji wciskania kabla.

12.3. PRZEWODY I KABLE

Najbardziej istotnym parametrem przewodów stosowanych do montażu elektronicznego jest przewodność elektryczna. Odcinek przewodu o długości l i przekroju S charakteryzuje się rezystancją R , zależną od rezystywności ρ użytego materiału

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Najczęściej stosowana jest czysta miedź (o rezystywności ok. $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), a także aluminium (ok. $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$). Mniejszą wartość ρ ma srebro ($1,59 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), ale ze względu na wysoki koszt przewody z czystego srebra nie są stosowane. W specjalnych zastosowaniach używa się drutów miedzianych pokrytych cienką powłoką srebra.

Prąd o natężeniu I przepływający przewodem o rezystancji R wywołuje spadek napięcia

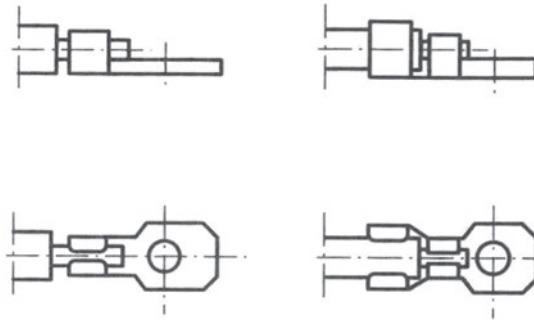
$$\Delta U = \rho \frac{l}{S} I,$$

co powinno być brane pod uwagę przy konstruowaniu połączeń.

Przewody wykonuje się z drutu lub linki pokrytej powłoką izolacyjną, zwykle polimerową. Wytrzymałość mechaniczna linki przy rozciąganiu i zginaniu jest większa niż drutu i takie przewody najczęściej są stosowane w połączeniach na trzecim i czwartym poziomie montażu. Przewody mogą być łączone bezpośrednio do wybranych elementów poprzez lutowanie, ale mogą być też zaopatrzone w końcówki umożliwiające tworzenie połączeń rozłącznych. Kształty kablowych końcówek montażowych są zróżnicowane (rys. 12.16), co wynika z różnych sposobów realizacji połączeń. Pojedyncze przewody są łączone z końcówkami poprzez lutowanie lub zaciskanie. Końcówka może być zaciśnięta jedynie na przewodzie pozbawionym izolacji, ale może też obejmować izolację przewodu (rys. 12.17). To drugie rozwiązanie zwiększa wytrzymałość mechaniczną i odporność złącza na wibracje, ponieważ polimer izolacji pochłania część energii drgań.



Rys. 12.16. Końcówki montażowe pojedynczych przewodów



Rys. 12.17. Końcówka kablowa zaciśnięta na odizolowanym przewodzie oraz na przewodzie i izolacji [16]



Rys. 12.18. Płaski kabel giętki

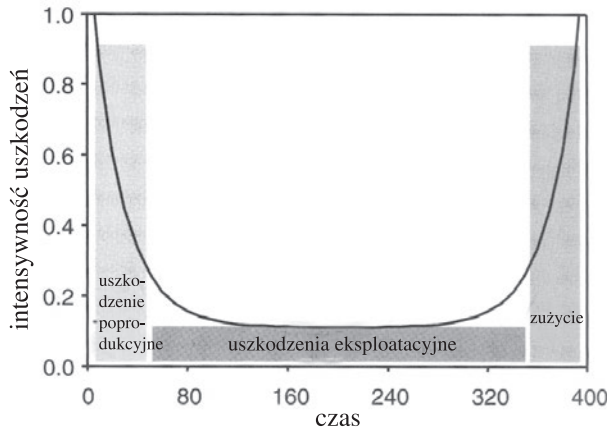
Oprócz pojedynczych przewodów, stosuje się kable koncentryczne lub kable wielożyłowe, w których odizolowane od siebie przewody prowadzone są we wspólnej zewnętrznej izolacji. Kable takie zaopatrzone są w złącza różnego typu (rys. 12.9), dołączone do przewodów połączeniami nierozłącznymi lub dokręcane. W powszechnym użyciu są płaskie, giętkie kable taśmowe, nazywane też kablami wstążkowymi (ang. *Flat Ribbon Cable*), zakończone złączami wielokontaktowymi. Przykład takiego kabla pokazano na rysunku 12.18.

13. NARAŻENIA ŚRODOWISKOWE PROBLEMY ODPROWADZENIA CIEPŁA

13.1. NIEZAWODNOŚĆ W MONTAŻU ELEKTRONICZNYM

Zgodnie z ogólną definicją niezawodność (ang. *reliability*) jest właściwością obiektu charakteryzującą jego zdolność do wykonywania funkcji w określonych warunkach i czasie. Ilościowy opis niezawodności obiektu określa się zazwyczaj doświadczalnie, biorąc pod uwagę warunki eksploatacyjne. Wyniki przedstawia się w postaci funkcji intensywności uszkodzeń $f(t)$, którą najczęstszy kształt pokazany na rysunku 13.1, nazywany jest krzywą „wannową”. Wykres ten wskazuje, że okres eksploatacyjny obiektu może być podzielony na trzy obszary determinowane poziomem intensywności uszkodzeń:

- obszar początkowy o wzmożonej intensywności uszkodzeń związany głównie z błędami produkcyjnymi,
- stosunkowo długi obszar normalnego użytkowania obiektu o niskim poziomie intensywności uszkodzeń spowodowanych głównie przekroczeniem zalecanych parametrów eksploatacyjnych, np. upadek, oraz
- obszar odpowiadający naturalnemu zużyciu się materiałów w trakcie normalnego użytkowania.



Rys. 13.1. Krzywa intensywności uszkodzeń (wannowa) wg [5]

W montażu elektronicznym niezawodność może być określona przez prawdopodobieństwo poprawnej pracy systemu (system spełnia wszystkie powierzone funkcje i czyn-

ności), w wymaganym czasie i określonych warunkach eksploatacji z uwzględnieniem zespołu czynników wymuszających, w tym czynników środowiskowych. Ten wymagany czas eksploatacji, czyli średni czas do pojawienia się uszkodzenia (ang. *mean time to failure*), może być bardzo zróżnicowany. Czas ten jest zwykle prognozowany już na etapie projektowania wyrobu o określonej niezawodności przy akceptowalnych kosztach. Jest rzeczą oczywistą, że w projektowaniu np. popularnego telefonu komórkowego zakłada się jego kilkuletnią niezawodną pracę, podczas gdy urządzenia podtrzymujące życie czy sprzęt kosmiczny muszą spełniać znacznie wyższe kryteria niezawodnościowe. Z tego względu urządzenia elektroniczne dzieli się na trzy klasy:

- klasa I; sprzęt o przeznaczeniu ogólnym, którego podstawowym wymaganiem jest poprawne działanie w określonych warunkach eksploatacyjnych,
- klasa II; sprzęt o przeznaczeniu specjalistycznym – o zwiększonej niezawodności w różnych warunkach narażeń środowiskowych,
- klasa III; sprzęt elektroniczny o dużej niezawodności przeznaczony do pracy w zróżnicowanych warunkach środowiskowych.

Przy wyborze technologii i stosowanych materiałów w montażu elektronicznym należy uwzględniać wymagania niezawodnościowe do budowanych urządzeń, a zatem niezbędna jest wiedza o narażeniach, jakim te urządzenia będą podlegały w warunkach eksploatacji.

13.2. NARAŻENIA ŚRODOWISKOWE

Przez pojęcie czynniki środowiskowe należy rozumieć wszystkie zjawiska fizykochemiczne oddziałujące na aparaturę elektroniczną, jak również czynniki wynikające z obsługi urządzenia. Te czynniki środowiskowe, które ze względu na ich destrukcyjny charakter stanowią dla urządzenia zagrożenie, mogą spowodować uszkodzenie lub obniżenie jakości, są nazywane czynnikami narażeniowymi. W wyniku oddziaływania tych czynników urządzenia elektroniczne mogą zmieniać swoje parametry, przy czym mogą to być zmiany trwałe lub odwracalne. Dla każdego z czynników narażeniowych (jeśli może on powodować działanie destrukcyjne), w zależności od stopnia zabezpieczenia urządzenia istnieje pewna granica, po przekroczeniu której działania czynnika zaczynają być niebezpieczne.

Z wielu czynników narażeniowych, destrukcyjnie oddziałujących na aparaturę elektroniczną, jedynie kilka ma wpływ na jakość połączeń w montażu aparatury elektronicznej. Są to głównie wilgoć i atmosfery korozyjne, narażenia mechaniczne oraz zmienna temperatura.

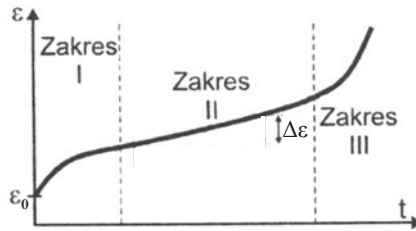
Problem wpływu wilgoci i możliwości powstawania procesów korozji omówiono w rozdziale 11, przy założeniu, że zanieczyszczenia pochodzą z procesów technologicznych. Podobnie negatywne skutki mogą wprowadzać atmosfery zawierające przemysłowe zanieczyszczenia gazowe, mgłę lub sól morską. Z tego względu należy ograniczać dostęp tych czynników do połączeń lub ograniczać ich negatywne oddziaływania poprzez

hermetyzację przestrzeni z połączeniami (np. *underfill*, *moulding*) lub stosowanie materiałów odpornych na korozję (np. pokrywanie złotem elementów złączy).

13.3. NARAŻENIA MECHANICZNE

Jak wcześniej wielokrotnie wspomiano, jedną z podstawowych funkcji, jaką powinny spełniać połączenia zgrzewane, lutowane i klejone jest zapewnienie trwałego mechanicznego połączenia łączonych elementów. Narażenia mechaniczne w postaci stałych obciążeń, obciążeń zmiennych i wibracji, a także uderów mogą w istotny sposób osłabiać wytrzymałość tych połączeń.

Zjawisko narastania trwałych odkształceń wraz z upływem czasu pod stałym obciążeniem określa się terminem pełzania. Proces ciągłego wzrostu odkształcenia ε przebiega powoli w funkcji czasu t i zależy od naprężenia σ (siły działającej na jednostkową powierzchnię) i temperatury T , przy czym szybkość pełzania zwiększa się w miarę zarówno wzrostu temperatury, jak i zwiększenia naprężenia. Efekt zmian zazwyczaj przedstawia się w postaci wykresów odkształceń w funkcji czasu dla stałych wartości σ i T . Typowy wykres, nazywany krzywą pełzania, pokazano na rys. 13.2. Po przyłożeniu siły następuje natychmiastowe odkształcenie sprężyste i szybki wzrost dyslokacji – zakres I. W zakresie II, w warunkach stanu równowagi termodynamicznej, obserwuje się pełzanie ustalone, które zazwyczaj trwa najdłużej. Jest to wynikiem równowagi procesów umacniania przez zgniot i odpężania. W zakresie III następuje natomiast zerwanie w wyniku znacznych zmian w mikrostrukturze. Dla metali zjawisko pełzania obserwuje się w temperaturze wyższej od 0,4 temperatury topnienia, a więc stopy lutownicze są podatne na tego typu odkształcenia w normalnych warunkach eksploatacji aparatury elektronicznej.

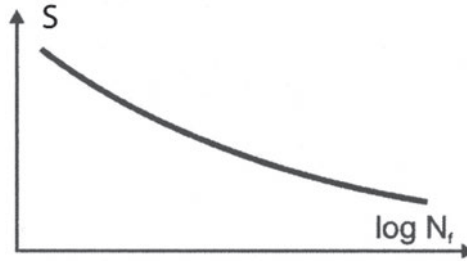


Rys. 13.2. Krzywa pełzania: odkształcenie w funkcji czasu przy stałym obciążeniu i temperaturze wg [15]

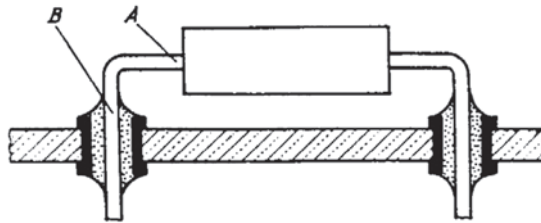
Znacznie bardziej destrukcyjne dla połączeń są naprężenia zmienne w czasie, w wyniku których powstaje uszkodzenie nazywane zmęczeniem materiału. W warunkach naprężeń dynamicznych (nieregularnych lub powtarzających się okresowo) możliwe jest uszkodzenie dla wartości naprężeń znacznie mniejszych niż wartości wytrzymałości na rozciąganie czy granicy plastyczności w warunkach obciążeń statycznych. Termin „zmę-

czenie” bierze się stąd, że tego typu uszkodzenie występuje po dłuższym okresie działania sił okresowo zmiennych wyrażanych liczbą cykli N_f .

Decydujący wpływ na wytrzymałość ma amplituda S czynnika zmęczeniowego. Dlatego też trwałość zmęczeniową konstrukcji przedstawia się w postaci krzywej S/N (rys. 13.3), która określa liczbę okresów powodujących uszkodzenie dla określonego poziomu amplitudy naprężenia. Ze względu na istotne rozrzuty wartości tak definiowanej trwałości zmęczeniowej operuje się raczej prawdopodobieństwem uszkodzenia.



Rys. 13.3. Trwałość zmęczeniowa; zależność amplitudy naprężenia od liczby okresów



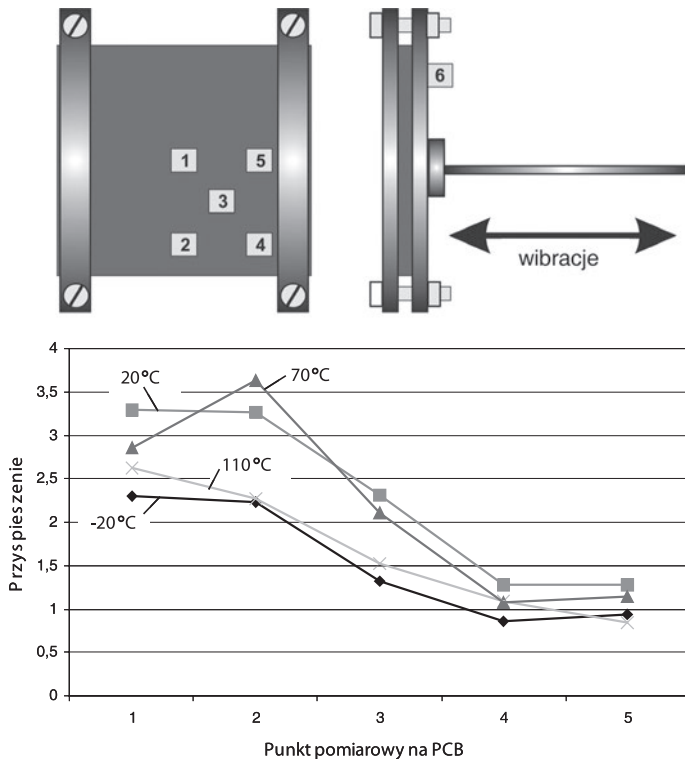
Długość wyprowadzenia (odcinek A-B) [mm]	Częstotliwość rezonansowa [s^{-1}]
7	2950
10	1870
15	980

Rys. 13.4. Zależność częstotliwości rezonansowej rezystorów MŁT-0,25 od długości wyprowadzeń [51]

W praktyce efekty związane ze zmęczeniem materiału mogą występować w warunkach wibracji, przy czym najbardziej krytyczny wpływ na podzespoły i połączenia wywierają wibracje o częstotliwościach równych lub zbliżonych do częstotliwości rezonansowych tych podzespołów. Na przykład częstotliwość rezonansowa rezystora THD jest zależna od długości jego wyprowadzeń (odcinek AB na rys.13.4). Szacuje się, że trwałość

zmęczeniowa takiego elementu podczas drgań wibracyjnych dochodzi do 10^7 cykli obciążeń, a uszkodzenie polega zwykle na oberwaniu wyprowadzeń. Jak przedstawiono w tabeli na rysunku 13.4, poprzez zmniejszanie długości wyprowadzeń wzrasta częstotliwość rezonansowa zamocowanego elementu znacznie powyżej częstotliwości mogących towarzyszyć transportowi.

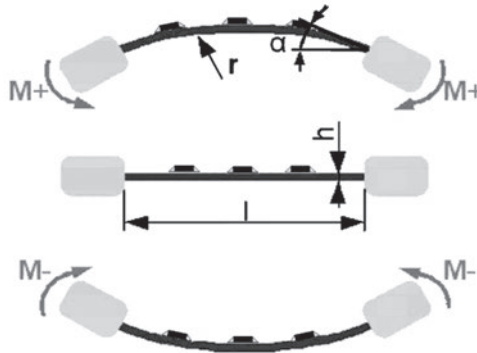
Przy dużych płytkach obwodów drukowanych z elementami montowanymi powierzchniowo w trakcie wibracji różne jej fragmenty podlegają zróżnicowanym przyspieszeniom. Na rysunku 13.5 pokazano typowy sposób zamocowania PCB w celu przeprowadzenia testów wibracyjnych z zaznaczonymi lokalizacjami czujników przyspieszeń. Pod rysunkiem podano względne wartości przyspieszeń dla tych lokalizacji czujników odniesione do przyspieszeń uchwytu (czujnik 6). Jak należało się spodziewać, w miarę oddalania punktu pomiarowego od ramki uchwytu, przyspieszenia rosną. Wartości przyspieszeń zależą od temperatury płytki, co jest wynikiem zmian jej elastyczności.



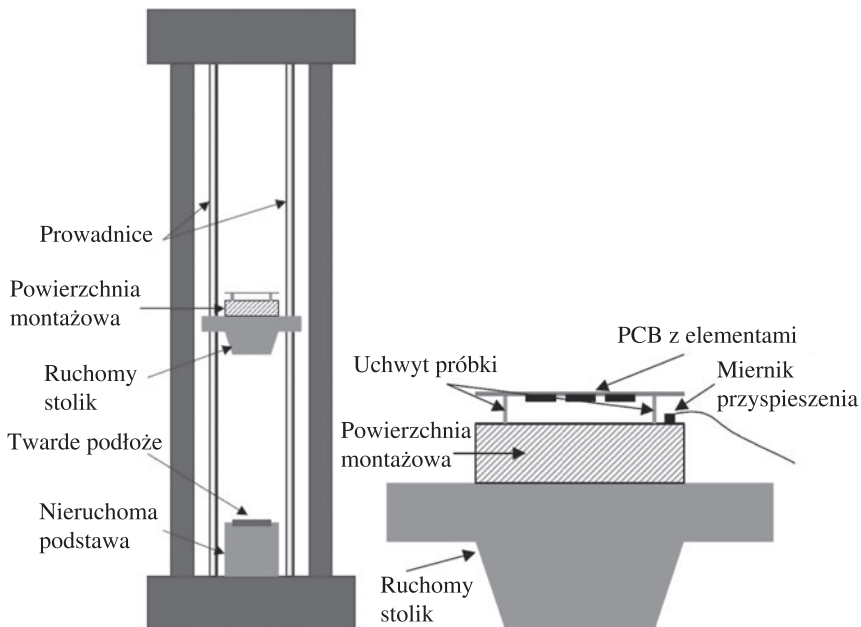
Rys. 13.5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i rozkład przyspieszeń na płycie obwodu drukowanego (w odniesieniu do przyspieszeń uchwytu – czujnik 6) w różnych temperaturach PCB wg [52]

Naprężenia, jakim podlegają złącza są determinowane masą dołączonych elementów i wartościom przyspieszeń, jakim te elementy podlegają. Warto także zauważyć, że

przy dużych odkształceniach płytki i sztywnych elementach, na złącza mogą oddziaływać duże siły odrywające. Efekty takie można oceniać, zmieniając cyklicznie moment gnący M (rys. 13.6), który powoduje odchylenie płytki o kąt $\pm\alpha$. Miarą niezawodności połączeń może być liczba cykli wyginania do wystąpienia przerwy w przepływie prądu przez złącza.



Rys. 13.6. Zasada badań niezawodności połączeń metodą dwustronnego wyginania zespołów [20]



Rys. 13.7. Przykład urządzenia do testów uderowych zespołów montowanych na PCB wg [53]

Typowym narażeniem mechanicznym jest uder, jednorazowy nagły wzrost i zanik przyspieszenia powstały w wyniku, na przykład upadku urządzenia na twardą powierzchnię. Testy uderowe (ang. *drop test*) w sposób jednoznaczny mogą wykazać wytrzymałość połączeń poddanych takim narażeniom. Zasada takich testów jest prosta: z określonej wysokości upuszcza się badany zespół na twarde podłoże i bada się (np. oceniając rezystancje) stan połączeń. Zwykle jednak powinny być spełnione dodatkowe wymagania definiowane przez normy lub procedury, dotyczące takich elementów aparatury testowej jak uchwyt próbki i prowadnice determinujące kierunek przyspieszeń przy uderzeniu, a także waga, wymiary i rozmieszczenie elementów itp. Przykład konstrukcji aparatury testowej do badania zmontowanych elementów przenośnej aparatury powszechnego użytku (telefony komórkowe, palmtopy, kamery itp.) pokazano na rys.13.7.

13.4. NARAŻENIA TERMICZNE

Każde urządzenie elektroniczne jest przetwornikiem energii P_E otrzymanej ze źródła zasilania na energię użyteczną P_U i energię cieplną P_T . Energia cieplna jest wynikiem przepływu prądu o natężeniu I przez skończoną wartość rezystancji R elementu. Wydzielana w czasie t ilość ciepła Q [J] dla prądu stałego wynosi

$$Q = UI t = I^2 R t.$$

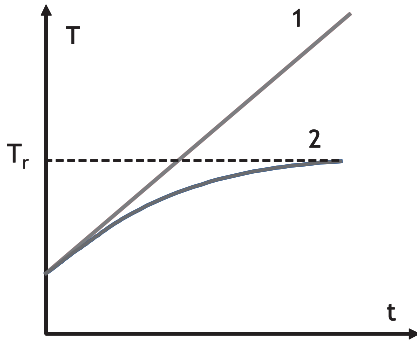
Im energia cieplna stanowiąca stratę energetyczną jest mniejsza, tym sprawność energetyczna urządzenia

$$\eta_{UE} = \frac{P_U}{P_E} 100\% = \left(1 - \frac{P_T}{P_E}\right) 100\%$$

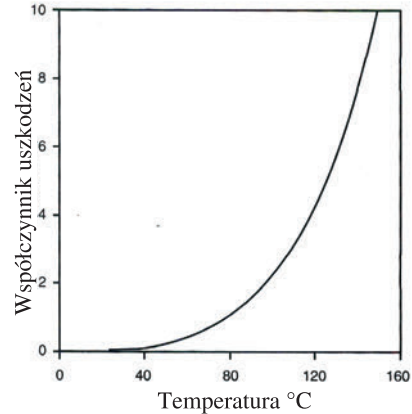
jest większa. W zależności od typu urządzenia sprawność energetyczna urządzeń elektronicznych jest różna, ale nie przekracza kilkudziesięciu procent. Oznacza to, że znaczna część dostarczonej energii jest zamieniana na ciepło. Podstawowym źródłem ciepła w aparaturze elektronicznej są wprawdzie rezystory, ale także i elementy czynne przyczyniają się do wzrostu temperatury urządzeń.

W chwili uruchomienia urządzenia temperatura jego elementów jest równa temperaturze otoczenia i zaczyna się podnosić wskutek wydzielania się ciepła. Gdyby cała wydzielana ilość ciepła pozostawała w elemencie, w miarę upływu czasu jego temperatura wzrastałaby liniowo, dążąc do nieskończoności (rys. 13.8). W rzeczywistości część ciepła ulega rozproszeniu (oddaniu do otoczenia), a temperatura elementu rośnie do momentu, w którym ilość rozpraszanego ciepła jest równa ilości ciepła wydzielanego. W takich warunkach ustala się temperatura równowagi T_r . Miniaturyzacja i duża gęstość upakowania utrudnia rozpraszanie ciepła i wysoka temperatura T_r może powodować zmiany paramet-

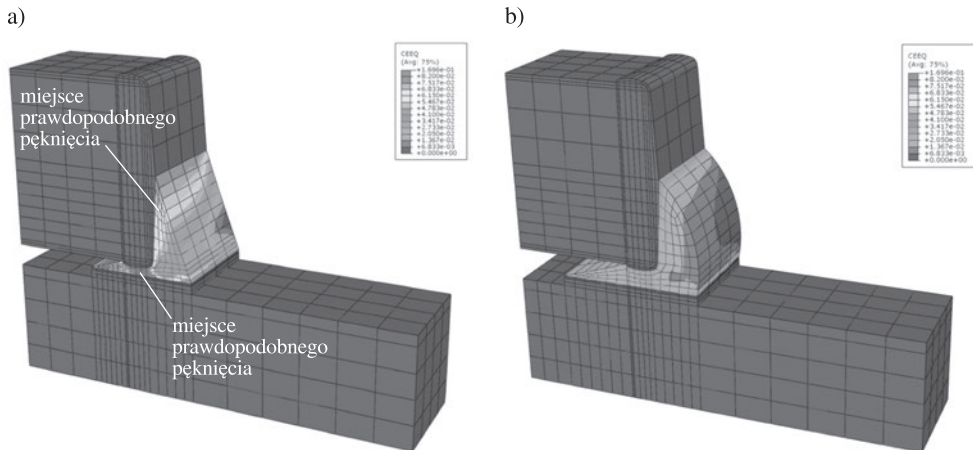
trów pracy lub uszkodzenia. Na rysunku 13.9 pokazano zależność szybkości uszkodzeń pojedynczego elementu od temperatury jego pracy. Z przedstawionej zależności wynika, że np. zmiana temperatury od 75 °C do 125 °C powoduje pięciokrotny wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu.



Rys. 13.8. Zmiana temperatury elementu w czasie pracy, gdy element jest izolowany termicznie (1) lub oddaje ciepło do otoczenia (2)



Rys. 13.9. Wpływ temperatury na intensywność uszkodzeń elementu wg [5]



Rys. 13.10. Wynik modelowania numerycznego (FEM) lutowanego połączenia rezystora (rezystor ceramiczny $BaTiO_3$ z wyprowadzeniem Ni) z PCB (FR-4 z polem lutowniczym Cu/Ni); kształt warstwy lutu powodujący duże (po lewej stronie) i małe (po prawej) wartości naprężeń przy zmianach temperatury [54]

W montażu elektronicznym zmiany temperatury mogą prowadzić do destrukcji połączeń w wyniku niedopasowania współczynników rozszerzalności cieplnej. Uszkodzeniom zapobiega się, stosując np. wypełnienia *underfil* w montażu flip chip (rozd. 4). Jednak

projektowanie urządzeń o określonej niezawodności powinno być związane z numeryczną analizą naprężeń termicznych i oceną prawdopodobieństwa uszkodzeń. Na rysunku 13.10 podano przykład wyniku analizy naprężeń termomechanicznych metodą „elementów skończonych” (ang. *Finite Element Method*, FEM) połączenia lutowanego ceramicznego rezystora z płytką obwodu drukowanego FR-4. Kształt połączenia na rysunku po prawej stronie powoduje, że naprężenia przy zmianach temperatury mają znacznie mniejsze wartości (w porównaniu z połączeniem pokazanym z lewej strony rysunku), w związku z czym niezawodność takiego złącza będzie większa.

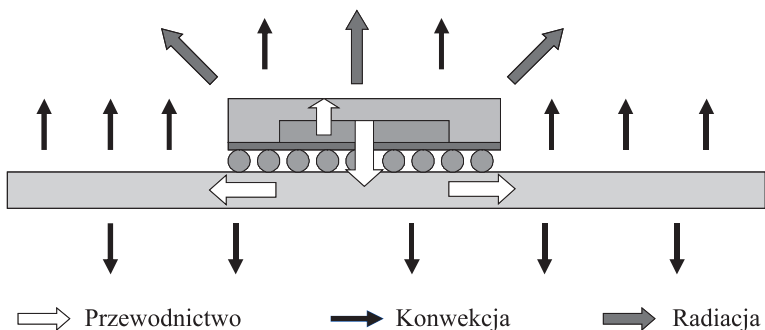
13.5. ODPROWADZANIE CIEPŁA

Na każdym poziomie montażu elektronicznego powinno tworzyć się warunki do dobrego odprowadzenia ciepła z jego źródła, tak aby wartość temperatury równowagi T_r była jak najmniejsza.

W aparaturze elektronicznej występują trzy podstawowe mechanizmy transportu ciepła, a mianowicie:

- przewodzenie,
- konwekcja (unoszenie),
- radiacja (promieniowanie),

przy czym udział poszczególnych sposobów odprowadzania ciepła zależy od konstrukcji i połączeń zespołu. Jako przykład na rysunku 13.11 pokazano sposoby odprowadzania ciepła z układu scalonego w obudowie montowanego techniką flip chip do płytki obwodu drukowanego. Jak widać, ciepło jest transportowane drogą przewodzenia do obudowy i do PCB, skąd jest odprowadzane poprzez konwekcję. Udział radiacji jest prawdopodobnie nieznaczny.



Rys. 13.11. Sposoby odprowadzania ciepła z układu scalonego

Przewodzenie ciepła polega na przenoszeniu energii wewnątrz ośrodka materialnego przy istnieniu gradientu temperatury. Przewodzenie nie jest związane z transportem masy, ale z przekazywaniem energii przez swobodne elektrony (jest to tzw. efekt elektronowy,

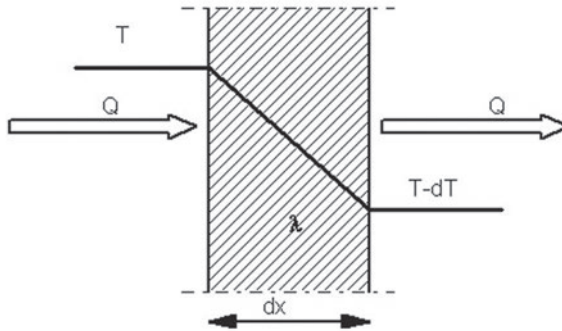
dominujący w metalach) oraz przez drgania sieci krystalicznej (efekt fononowy). Efekty te są addytywne, zatem całkowita wartość przewodności cieplnej λ stanowi sumę składowej elektronowej λ_e i fononowej λ_f

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_f.$$

Dla jednokierunkowego i ustalonego przewodzenia ciepła obowiązuje prawo Fouriera, którego różniczkowa postać wygląda następująco:

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx},$$

gdzie Q [W] jest strumieniem ciepła płynącego w kierunku x (determinowanego różnicą temperatury T – rys. 13.12), A – powierzchnią prostopadłą do strumienia ciepła, natomiast λ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła wyrażonym w $W/(m \cdot K)$, charakterystycznym dla ośrodka, w którym następuje transport ciepła. Ponieważ gradient temperatury jest ujemny w kierunku przepływu ciepła, a strumień ciepła jest zawsze wartością dodatnią (podobnie jak współczynnik przewodności cieplnej), zatem po prawej stronie równania Fouriera musi być znak minus.



Rys. 13.12. Przewodzenie ciepła przez jednorodny ośrodek [45]

Konwekcja zachodzi w ośrodku płynnym lub gazowym, który może się swobodnie przemieszczać. Przy przekazywaniu ciepła przez konwekcję występuje makroskopowe przemieszczanie się cząsteczek ośrodka, które przejmują ciepło i mogą je transportować. Ilość ciepła Q odprowadzonego drogą konwekcji z powierzchni A jest proporcjonalna do różnicy temperatury między powierzchnią, z której następuje odprowadzenie ciepła T_s , a ośrodkiem (medium), który zapewnia konwekcję T_a . Współczynnikiem proporcjonalności jest tzw. współczynnik konwekcyjnego przekazywania ciepła h , a strumień ciepła (ilość ciepła dQ przekazana w czasie dt) opisuje zależność:

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_s - T_a).$$

Współczynnik przekazywania ciepła jest zależny od wielu czynników i zwykle jest określany doświadczalnie dla określonego rodzaju medium, materiału i stanu powierzchni, z której przekazywane jest ciepło, a także od jej usytuowania w przestrzeni.

Transport ciepła poprzez radiację polega na emitowaniu fal elektromagnetycznych, co oznacza, że ten rodzaj transportu ciepła nie wymaga pośrednictwa ośrodka w żadnej formie. Wysyłanie promieniowania wiąże się ze spadkiem temperatury ciała promieniującego, ale jednocześnie takie ciało odbiera promieniowanie, które zostaje zamienione na ciepło. O oddawaniu ciepła można mówić zatem tylko wtedy, gdy energia promieniowania ciała jest większa od energii absorbowanej. Wartość energii cieplnej emitowanej z powierzchni A opisuje wzór:

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma A(\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_2 T_2^4),$$

gdzie: σ – stała Stefana–Boltzmann (stała promieniowania ciała doskonale czarnego) = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, ε_1 i ε_2 oraz T_1 i T_2 – współczynniki emisyjności i temperatury odpowiednio powierzchni ciała emitującego i absorbującego promieniowanie (lub otoczenia). Dla ciała doskonale czarnego ε przyjmuje największą wartość równą 1.

13.6. CHŁODZENIE

Chłodzenie jest celowym działaniem mającym na celu stworzenie drogi transportu ciepła od jego źródła do odbiornika. W aparaturze elektronicznej odbiornikiem ciepła jest zazwyczaj otoczenie, a drogę transportu powinien zapewnić odpowiedni montaż i konstrukcja aparatury.

W przykładzie demonstrującym sposoby odprowadzania ciepła (rys. 13.11) efektywność chłodzenia nie jest duża z następujących powodów:

- przewodzenie ciepła jest mało efektywne ze względu na małe powierzchnie styku kontaktów podwyższonych (flip chip),
- unoszenie ciepła z płaskiej, niedużej powierzchni obudowy jest ograniczone,
- w stosunkowo niskiej temperaturze efekt promieniowania ma minimalne znaczenie.

Efektywność chłodzenia znacznie wzrośnie, jeśli odpowiednio zaprojektuje się drogę przepływu ciepła ze źródła do odbiornika ciepła (w tym wypadku – otoczenia).

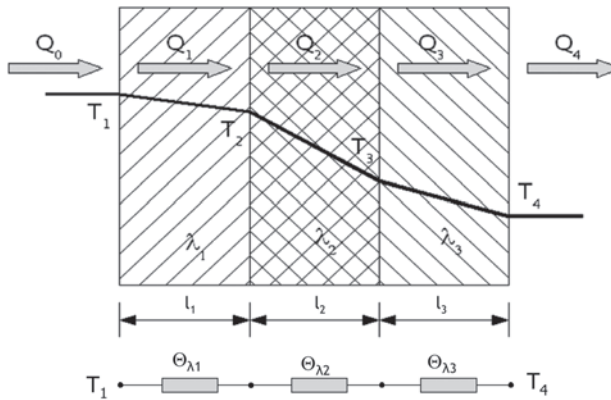
W analizie przepływu strumienia ciepła bardzo często stosuje się tzw. analogię elektrotermiczną, co oznacza, że podstawowe równania mogą być interpretowane podobnie jak prawo Ohma. A zatem odpowiednikiem strumienia ciepła Q jest natężenie prądu I , różnicy temperatur $\Delta T - \Delta U$, a rezystancji termicznej Θ_λ – rezystancja elektryczna R . Dla dłu-

gości / drogi przepływu ciepła przez ośrodek, ta analogia, według równania Fouriera, pozwala na obliczanie rezystancji termicznej w następujący sposób:

$$I = \frac{\Delta U}{R} \rightarrow Q = \frac{\Delta T}{\Theta_\lambda} = \lambda A \frac{\Delta T}{l} \rightarrow \Theta_\lambda = \frac{l}{\lambda A}.$$

Zwykle ciepło przepływa przez wiele różnych warstw, co można przedstawić w postaci szeregowego połączenia rezystancji termicznych (rys. 13.13). Jeśli zaniedba się konwekcję i radiację, to, analogicznie do natężenia prądu elektrycznego, wartość strumienia ciepła jest niezmienna ($Q_1 = Q_4$).

Rezystancję termiczną $\Theta_{\lambda 2}$ (rys. 13.13) można potraktować jako rezystancję termiczną styku pomiędzy warstwami 1 i 3, na którym następuje duży spadek temperatury (rys. 11.18). Przy stosowaniu termicznie przewodzących materiałów wypełniających szczelinę styku (TIM) zazwyczaj jako termiczną rezystancję styku uważa się sumę rezystancji warstwy W tego materiału oraz rezystancji $\Theta_{\lambda 1}$ i $\Theta_{\lambda 2}$ pokazanych na rys. 11.19.



Rys. 13.13. Przewodzenie ciepła przez strukturę złożoną z warstw prostopadłych do kierunku przepływu ciepła [45]

Analizując podane wyżej zależności, łatwo dojść do wniosku, że przewodzenie ciepła jest większe, jeśli stosowane są materiały o dużych wartościach współczynnika przewodzenia ciepła λ , małych grubościach l i dużych powierzchniach styku A . W celu minimalizacji wpływu styku liczba warstw powinna być ograniczana, a wartości rezystancji styków – minimalizowane.

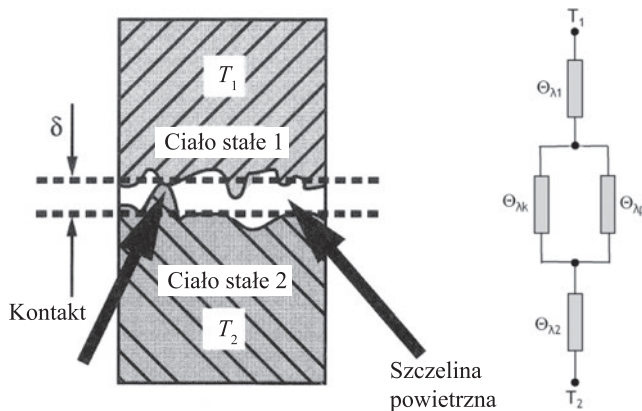
W tabeli 13.1 podano wartości współczynników przewodzenia ciepła λ materiałów stosowanych w montażu elektronicznym. Wartości te odniesiono do przewodności cieplnej powietrza.

Tabela 13.1. Wartości współczynników przewodzenia ciepła λ materiałów stosowanych w montażu elektronicznym¹

Materiał	λ [W/(m·K)]	λ/λ powietrza
Powietrze	0,024	1
Żywica epoksydowa	0,23	9,6
Kompozyt przewodzący na bazie żywicy	0,35	14,6
Poliimid	0,33	13,8
FR4	0,30	12,5
Woda	0,59	24,6
Pasta przewodząca termicznie	1,10	46
Al ₂ O ₃	22,0	916
Aluminium	150	6250
Krzem	120	5000
Miedź	300	12500
Złoto	401	16708
Srebro	429	17875
Diament syntetyczny	2000	83330

¹ Wartości λ mogą się różnić w zależności od źródła cytowania; są zależne od temperatury.

Jak widać z danych zamieszczonych w tabeli, transport ciepła jest najmniej efektywny przy przepływie przez szczelinę powietrzną. Przypadek taki pokazano na rys. 13.14. Oporności termiczne $\Theta_{\lambda k}$ i $\Theta_{\lambda p}$, reprezentujące odpowiednio rzeczywisty kontakt i przepływ ciepła przez warstwę powietrza są bardzo duże ze względu na minimalną powierzchnię styku (A), czyli powierzchnię prostopadłą do kierunku przepływu ciepła oraz bardzo małą wartość współczynnika λ powietrza. Z tego względu niezbędne jest stosowa-



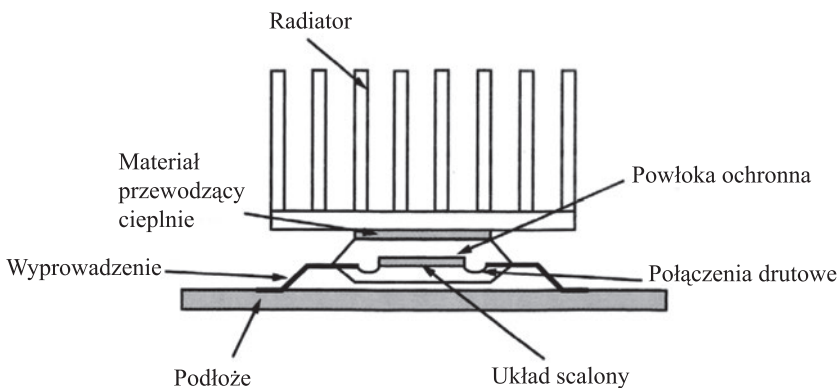
Rys. 13.14. Przewodzenie ciepła przez styk między dwiema płaszczyznami [5]

nie materiałów wypełniających szczelinę, które ułatwiają transport ciepła (ang. *Thermal Interface Materials*, TIM). Powinny to być materiały o dużym współczynniku przewodzenia ciepła, które dokładnie dostosowują się do mikrostruktury powierzchni (jak pokazano to na rys. 11.19).

W montażu elektronicznym stosuje się dwa rodzaje materiałów, które spełniają wymagania TIM, a mianowicie takie, które jednocześnie zapewniają mechaniczne połączenie stykających się powierzchni oraz materiały wymagające innych sposobów związania łączonych warstw lub elementów. Do pierwszej grupy należą omówione w poprzednich rozdziałach luty i kleje termicznie przewodzące, do drugiej grupy można zaliczyć następujące materiały i kompozyty:

- pasty termicznie przewodzące (np. zawiesina kulek miedzi o rozmiarach mikrometrowych w matrycy o dużej lepkości (ang. *thermal grease*),
- materiały termicznie przewodzące w formie żelu,
- materiały i stopy metali i inne materiały aplikowane w formie stałej, które w podwyższonej temperaturze zmieniają fazę (topią się lub zmniejszają lepkość), dzięki czemu dokładnie wypełniają mikronierówności powierzchni,
- taśmy i folie z miękkich materiałów, które pod wpływem dużych nacisków odkształcają się plastycznie dostosowując do mikrostruktury powierzchni.

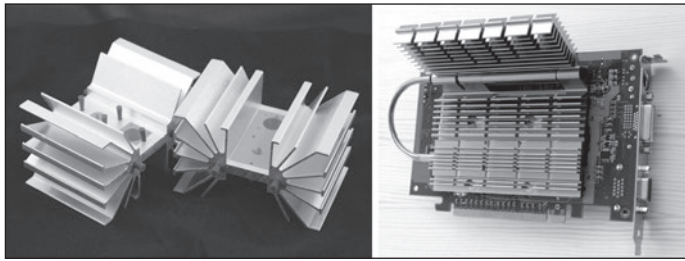
Stworzenie dobrych warunków przewodzenia ciepła może być wystarczające dla zapewnienia chłodzenia elementów montowanych w specjalnych obudowach (np. QFN, rys. 5.19), łączonych do podłoża dobrze odprowadzających ciepło (np. z rdzeniem metalowym, rys. 6.5). Końcowym elementem transportu ciepła musi być odbiornik o niższej temperaturze niż temperatura źródła. W specjalnych rozwiązaniach konstrukcyjnych może to być tzw. ogniwo Peltiera, którego zasada działania polega na tym, że na złączu dwóch różnych metali przy przepływie prądu w odpowiednim kierunku złącze pochłania ciepło. Wydajność takiego odbiornika jest niewielka i jego wykorzystanie w elektronice użytkowej jest marginalne.



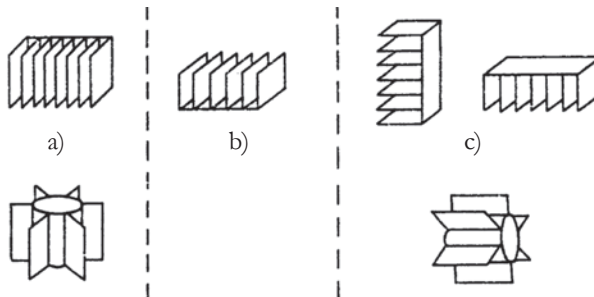
Rys. 13.15. Chłodzenie za pomocą radiatora wg [5]

Zwykle odbiornikiem ciepła jest powietrze otaczające element lub konstrukcja mechaniczna zespołu elektronicznego. Przy stosunkowo niewielkiej energii cieplnej generowanej ze źródła, ciepło jest odprowadzane wskutek przewodzenia (przy odpowiednim montażu na różnych poziomach), końcowym elementem transportu ciepła jest obudowa, skąd ciepło jest odbierane przez otoczenie. Znacznie wydajniejszym przekąźnikiem energii cieplnej jest radiator, zapewniający odprowadzenie ciepła do otoczenia drogą konwekcji i promieniowania (rys. 13.15).

Radiatory (wraz z elementami mocującymi mogą nosić nazwę rozpraszaczy ciepła) są konstrukcjami wykonanymi z materiałów o dobrym przewodnictwie cieplnym (głównie ze stopów aluminium, ale też z miedzi, brązów), o silnie rozbudowanej powierzchni, które mogą chłodzić pojedyncze elementy elektroniczne lub cały zespół. Przykłady radiatorów pokazano na rysunku 13.16. Radiator przejmuje ciepło drogą przewodzenia, a rozwi-



Rys. 13.16. Przykłady radiatorów chłodzących pojedyncze elementy elektroniczne lub cały zespół

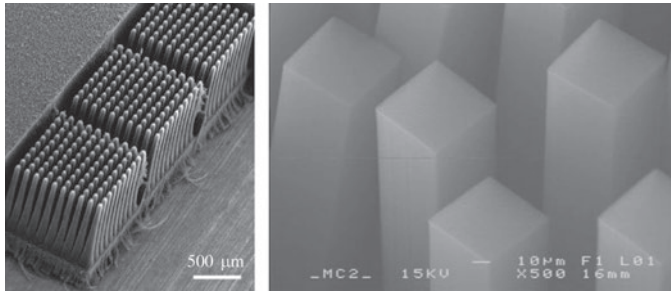


Rys. 13.17. Usytuowanie radiatorów uźebrowanych w przestrzeni: a) preferowane, b) dopuszczalne, c) niedopuszczalne [51]

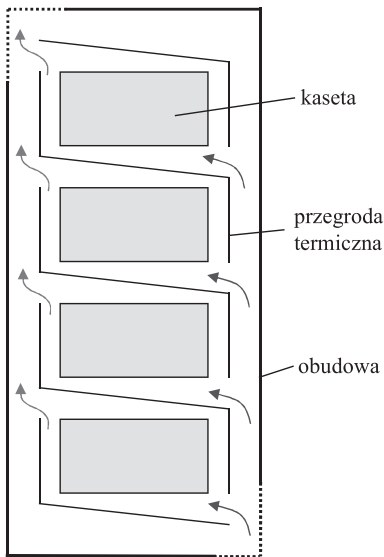
nięta powierzchnia radiatora ułatwia wymianę ciepła z otoczeniem przez promieniowanie i przejmowanie ciepła przez przepływające powietrze (przejmowanie ciepła jest złożonym mechanizmem, trudnym do analizy teoretycznej). Dla wydajnego odprowadzania ciepła przez promieniowane radiator powinien mieć jak największą powierzchnię o dużym współczynniku emisyjności ϵ (czarna, matowa), a „żebra” powinny być tak usytuowane, aby zapewnić swobodny kontakt chłodzonych powierzchni z przepływającym powietrzem. Należy przy tym pamiętać, że w wypadku konwekcji naturalnej zachodzi zja-

wisko unoszenia spowodowane siłą wyporu, wynikającą wyłącznie z różnej gęstości cząstek nagranych i zimnych. Dlatego nie bez znaczenia jest usytuowanie uźebrowania radiatora w przestrzeni (rys. 13.17).

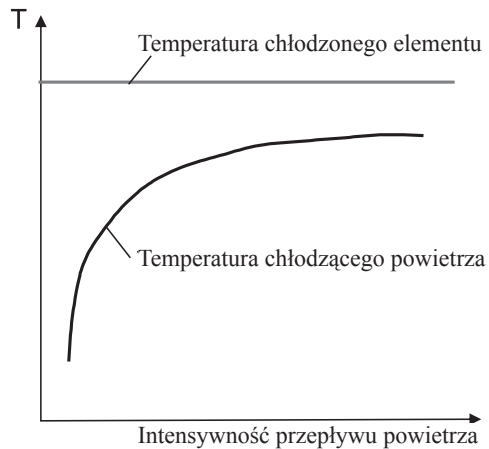
Miniaturyzacja i duża gęstość upakowania wydajnych źródeł ciepła wymaga poszukiwania nowych materiałów i konstrukcji radiatorów. Na rysunku 13.18 pokazano doświadczalne radiatory w postaci kanałów do przepływu powietrza wykonane z nanorurek węglowych (CNT) – materiału o ekstremalnie dużym przewodnictwie cieplnym.



Rys. 13.18. Radiatory wykonane z nanorurek węglowych [55]



Rys. 13.19. Przepływ powietrza chłodzącego w wielopoziomym bloku aparatury elektronicznej

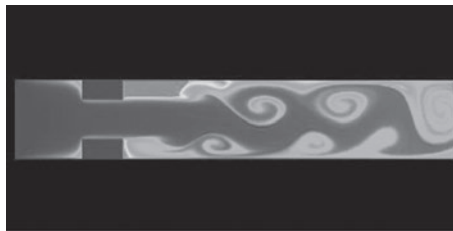


Rys. 13.20. Zależność zapotrzebowania chłodzącego powietrza od różnicy temperatur chłodzonego obiektu i powietrza

Skuteczne chłodzenie aparatury elektronicznej w obudowach wymaga przewidywania właściwego obiegu powietrza chłodzącego. W przykładzie pokazanym na rysunku 13.19

każda kasetka w wielopoziomowym bloku jest chłodzona zimnym powietrzem. Usunięcie przegrody termicznej powodowałoby ciągły wzrost temperatury powietrza w miarę jego przepływu ku górze. Aby umożliwić przepływ powietrza w takiej aparaturze elektronicznej, stosuje się w obudowie otwory i perforacje. Całkowita powierzchnia otworów w obudowie powinna stanowić minimum 10% całej powierzchni obudowy. Oczywiście otwory wlotowe umieszcza się w dolnej części obudowy aparatury, a wylotowe – w górnej. Należy unikać koncentracji źródeł ciepła. Dla swobodnego przepływu powietrza wewnątrz aparatury należy tak zabudować to wnętrze, aby prześwity stanowiły w dowolnym przekroju poprzecznym minimum 10% powierzchni tego przekroju.

Zasadniczym kryterium wyboru sposobu chłodzenia elementów i zespołów elektronicznych jest wartość powierzchniowej gęstości mocy niezbędnej do odprowadzenia. Przy wartości powyżej $0,04 \text{ W/cm}^2$ zwykle stosuje się wymuszony obieg powietrza do chłodzenia. Zastosowanie obiegu wymuszonego (np. wokół radiatora) powoduje znaczne zwiększenie wartości współczynnika przekazywania ciepła i zdecydowany wzrost wydajności chłodzenia. Wydajność ta zależy między innymi od intensywności przepływu powietrza i jego temperatury. Na rysunku 13.20 pokazano zależność zapotrzebowania powietrza chłodzącego od różnicy temperatur chłodzonego obiektu i powietrza. Jak widać, najbardziej skuteczne jest użycie w niewielkich ilościach powietrza o niskiej temperaturze. W przypadku intensywnego przepływu gorącego powietrza nie następuje zwiększenie wydajności chłodzenia. W obiegu wymuszonym powinien być zawsze osiągnięty przepływ burzliwy (turbulentny) w pobliżu źródeł ciepła. Przepływ taki osiąga się, stosując przegrody zaburzające równomierny przepływ laminarny (rys. 13.21).

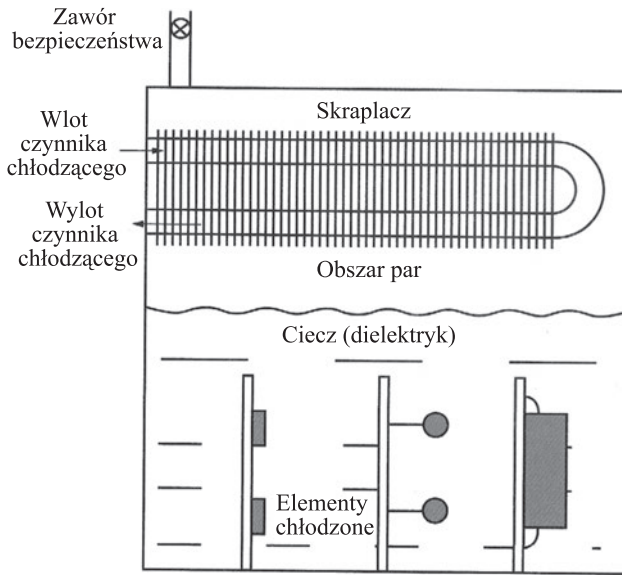


Rys. 13.21. Przegroda zmieniająca przepływ laminarny w turbulentny

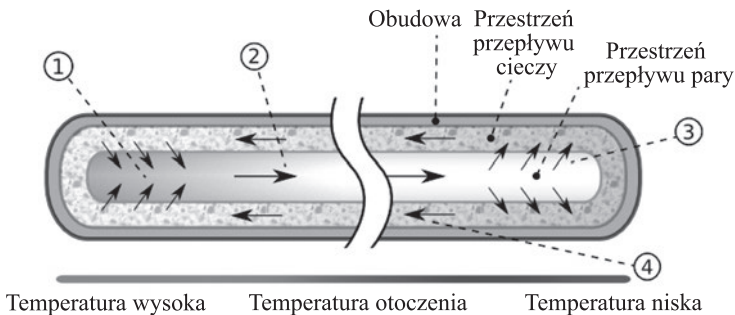
Chłodzenie wymuszone aparatury elektronicznej może odbywać się w obiegu zamkniętym lub otwartym. Obieg zamknięty jest stosowany sporadycznie (np. w samolotach) i wymaga wymienników ciepła. W obiegu otwartym włacza się do obudowy chłodne powietrze lub odciąga się gorące powietrze z wnętrza obudowy do otoczenia. Do przepływu powietrza stosuje się wentylatory o różnej konstrukcji i wydajności zaopatrzone w filtry. Jeśli powietrze włacza się do systemu chłodzącego, filtry zapobiegają w mniejszym lub większym stopniu wprowadzeniu do aparatury znajdujących się w powietrzu zawieszin ciał stałych (pyły, sadze, aerozole, cząstki soli, związki organiczne o wielkościach od $0,001$ do $5000 \mu\text{m}$). Najczęściej są stosowane dwa rodzaje filtrów; porowate su-

che i porowate półsuche. W filtrach suchych powietrze przechodzi przez otwory mniejsze od wielkości cząsteczek zanieczyszczeń, co powoduje duże opory dla przepływu i prowadzi do trwałych zanieczyszczeń. W filtrach półsuchych cząstki nie są mechanicznie zatrzymywane, ale droga ich przelotu jest kręta. Bezwładność cząstek powoduje, że przy takim przebiegu uderzają one o ścianki pokryte materiałami lepкими, na których są osadzone. Filtry takie mogą być wielokrotnie regenerowane.

Chłodzenie cieczą jest bardziej efektywne od chłodzenia powietrzem i jest stosowane w urządzeniach dużej mocy. Elementy mogą być bezpośrednio zanurzone w cieczy. Można też zastosować chłodzenie pośrednie.



Rys. 13.22. Przykład systemu chłodzenia bezpośredniego z wykorzystaniem ciepła parowania cieczy wg [5]



Rys. 13.23. Zasada wymiany ciepła w rurze chłodniczej

Najbardziej efektywną metodą chłodzenia bezpośredniego jest chłodzenie z wykorzystaniem ciepła parowania cieczy (rys. 13.22). Przy stosowaniu niskowrzących cieczy, ciepło przejmowane od ochładzanych elementów powoduje wytwarzanie pary na powierzchni wymiany ciepła. Para dostaje się do chłodnicy, ulegając skropleniu. Oprócz dobrej przewodności cieplnej, ciecz musi charakteryzować się dużą wartością rezystancji elektrycznej, mieć dużą odporność na przebicia, a także małe współczynniki stratności i przenikalności dielektrycznej. Najlepsze właściwości chłodnicze ma woda i mimo niespełnienia wielu z podanych wyżej wymagań jest powszechnie stosowana do chłodzenia. Używane są także oleje syntetyczne lub silikonowe, glikol, metanol i etanol.

Chłodzenie pośrednie polega na tworzeniu konstrukcji, w których ciepło drogą przewodzenia doprowadzane jest do chłodnicy zaopatrzonej w kanały, przez które przepływa woda w obiegu zamkniętym (z wymiennikiem ciepła) lub otwartym. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie rur chłodniczych (ang. *heat pipe*), nazywanych także ciepłowodami. W rurze chłodniczej (rys. 13.23) ciepło jest pobierane od chłodzonego elementu w części zwanej parownikiem, gdzie następuje parowanie cieczy (1). W wyniku różnicy ciśnień między parownikiem a skraplaczem, para przechodzi (2) do skraplacza. Tam ciepło odbierane jest przez radiator lub inny odbiornik ciepła i para ulega skropleniu (3). Powstająca ciecz dzięki włóskowatości materiału, którym wyłożona jest rura, wraca ponownie do parownika (4). Cieczą chłodzącą może być woda, NH_3 , CH_3OH .

LITERATURA

- [1] Scheel W., Reichl H., *PCB – Packaging follows IC-Packaging*, 8th International Academic Conference on Electronic Packaging Education and Training, Wien 2005.
- [2] Kisiel R., *Połączenia lutowane w montażu elektronicznym z zastosowaniem materiałów ekologicznych*, Prace Naukowe – Elektronika, z. 170, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [3] Aschenbrenner R., *Materiały udostępnione przez Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration*, Berlin 2008.
- [4] Friedel K., *Wykład „Montaż w elektronice”* (ilustracje), Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008 .
- [5] Tummala R.R., *Fundamentals of Microsystems Packaging*, McGraw-Hill, 2001.
- [6] Tummala R.R., Swaminathan M., *Introduction to System-On-Package (SOP); Miniaturization of the Entire Systems*, McGraw-Hill, 2008.
- [7] Bober B., Felba J., Żaluk Z., *Ocena możliwości stosowania metody flip-chip do montażu elementów zewnętrznych*, opracowanie wewnętrzne Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
- [8] Felba J., *Wykład „Zasady konstrukcji aparatury elektronicznej”*, Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [9] *Materiały Forschungszentrum Jülich*, www.fz-juelich.de
- [10] Charles H.K., *The Wirebonded Interconnect in Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures*, ed. Ephraim Suhir, Springer Science+Business Media Inc., 2007.
- [11] Tomczyk M., *Analiza procesów termokinetycznych w obszarze połączeń, przewodzących prądy o dużych gęstościach, wykonanych techniką laserową*, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2007.
- [12] European Project *Downscaled Assembly of Vertically Interconnected Devices*, www.david-project.eu
- [13] Bober B., Bochenek A., Olszewska-Mateja B., Żaluk Z., *Current trends in flip-chip bonding technique for Multichip Modules – especially micro-jet printing*, 24th International Conference IMAPS Poland Chapter, Rytro 2000.
- [14] Frear D.R., Jang J.W., Lin J.K., Zhang C., *Pb-Free Solders for Flip-Chip Interconnects*, JOM journal, 53(6) (2001), 28–32.
- [15] Wymysłowski A., *Numeryczne metody projektowania termomechanicznego w montażu elektronicznym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [16] Kisiel R., *Podstawy technologii dla elektroników – poradnik praktyczny*, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2005.
- [17] Borecki J., *Mikropołączenia międzywarstwowe w płytkach obwodów drukowanych o dużej gęstości upakowania*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2008.
- [18] Bukat K., Hackiewicz H., *Lutowanie bezołowiowe*, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2007.
- [19] Felba J., *Wykład „Materiały i technologia aparatury elektronicznej”*, Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [20] Sitek J., *Badania wpływu zwilżalności materiałów bezołowiowych na właściwości połączeń lutowanych uzyskanych w procesie bezołowiowego montażu powierzchniowego*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2008.
- [21] Engelmaier W., *Void in solder joints – reliability*, Global SMT & Packaging magazine 6, 2006, 44–45.
- [22] Yoon-Chul Sohn, Jin Yu, Sung K. Kang, Da-Yuan Shih, Taek-Yeong Lee, *Study of Spalling Behavior of Intermetallic Compounds During the Reaction Between Electroless Ni-P Metallization and Lead-free Solders*, Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas 2004, 75–81.

- [23] Polska Norma PN-EN 61192-1, *Wymagania dotyczące jakości wykonania zespołów elektronicznych lutowanych; Część 1: Postanowienia ogólne*, 2003.
- [24] Polska Norma PN-EN 61192-2, *Wymagania dotyczące jakości wykonania zespołów elektronicznych lutowanych; Część 2: Zespoły wykonywane techniką montażu powierzchniowego*, 2003.
- [25] Materiały *Philips Semiconductors Integrated Circuit Packages Data Handbook, Chapter 5: SMD Mounting Methods*, 2000, <http://www.standardics.nxp.com/packaging/handbook>.
- [26] Illyefalvi-Vitéz Z., Balogh B., Baranyay Z., Bátorfi R., Farmer G., *Life-time Test of Laser Soldered Joints on Flexible Boards*, 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference, London-Greenwich, 2008, 877.
- [27] *Materiały publikowane przez NASA*, <http://nepp.nasa.gov/whisker/>
- [28] Moskwa K., Mazurkiewicz B., *Korozja i ochrona przed korozją*, Akademia Górniczo-Hutnicza, http://www.chemia.odlew.agh.edu.pl/cho_wo/korozja.pdf
- [29] Zeng K., Tu K.N., *Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology*, Materials Science and Engineering Reports, R38, 2002, 55–105.
- [30] *Wyposażenie Zakładu Technologii Aparatury Elektronicznej*, www.lipec.info
- [31] Polska Norma PN-EN 61191-1, *Zespoły na płytach drukowanych; Część 1: Specyfikacja wspólna. Wymagania dotyczące elektrycznych i elektronicznych zespołów lutowanych, wykonanych techniką montażu powierzchniowego i technikami związanymi*, 2004.
- [32] Materiały firmy LOCTITE *World wide design handbook*, <http://www.loctite.de/loctite.htm>
- [33] Brojer Z., Hertz Z., Pęczek P., *Żywice epoksydowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
- [34] Wong C.P., Lu Daoqiang, *Recent Advances on Electrically Conductive Adhesives for Electronics Applications*, 4th Int. Conf. on Adhesive Joining & Coating Technology in Electronics Manufacturing, Helsinki 2000, 121–128.
- [35] Friedel K., Kisiel R., *Finite-element modeling: strain & stress distribution in adhesive bonded joints of 1206 chip components on FR-4 substrates*. 13th European Microelectronics and Packaging Conference, Strasburg 2001, 382–387.
- [36] Felba J., *Electrical Properties of Adhesive Joints*, European Microelectronics Packaging and Interconnections Symposium, Kraków 2002, 6–11.
- [37] Ukita Y., Tateyama K., Segawa M., Tojo Y., Gotoh H., Oosako K., *Lead free mount adhesive using silver nanoparticles applied to power discrete package*. International Symposium on Microelectronics IMAPS, Long Beach 2004, session WA7.
- [38] Morris J.E., Liu J., *Electrically Conductive Adhesives, A research Status Review, in Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability, Packaging*, Springer 2007.
- [39] Cagle C.V., *Kleje i klejenie; poradnik inżyniera i technika*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
- [40] Mościcki A., Felba J., Sobierajski T., Kudzia J., *Snap curing electrically conductive adhesive formulation for solder replacement applications*, Journal of Electronic Packaging, Vol. 127, No. 2, 2005, 91–95.
- [41] Felba J., Friedel K., *Zastosowanie klejów w montażu aparatury elektronicznej*, Elektronika Nr 10, Vol. XLII, 2001, 55–58.
- [42] Felba J., Friedel K., Kisiel R., Mościcki A., *The Influence of Silver Filler Concentration in Epoxy Adhesives on Electrical and Mechanical Properties of Adhesive Joints*, 25th International Conference and Exhibition IMAPS – Poland, Polańczyk 2001, 67–70.
- [43] Sarvar F., Whalley D.C., Conway P.P., *Thermal Interface Materials – A review of the State of Art*, 1st Electronics Systemintegration Technology Conference, Dresden 2006, 1292.
- [44] Felba J., *Thermally Conductive Nanocomposites in NanoBio Packaging* (edited by C.P. Wong and Jack K. Moon), Springer 2010.
- [45] Tomasz Fałat T., *Transport ciepła w polimerowych materiałach kompozytowych stosowanych w montażu aparatury elektronicznej*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007.
- [46] Chen C., Wang L., Li R., Jiang G., Yu H., Chen T., *Effect of silver nanowires on electrical conductance of system composed of silver particles*, Journal of Materials Science, Vol. 42, Issue 9, 2007, 3172.

-
- [47] Wu H., Wu X., Ge M., Zhang Q., Wang Y., Jiang J., *Properties investigation on isotropic conductive adhesives filled with silver coated carbon nanotubes*, Composites Science and Technology, Vol. 67, 2007.
- [48] Wang Z., Yu L., Zhang W., Ding Y., Li Y., Han J., Zhu Z., Xu H., He G., Chen Y., Hu G., *Amorphous molecular junctions produced by ion irradiation on carbon nanotubes*, Physics Letters A, Vol. 324, 2004, 321.
- [49] Kolbe J., Arp A., Calderone F., Meyer E.M., Meyer W., Schaefer H., Stuve M., *Inkjettable conductive adhesive for use in microelectronics and microsystem technology*, 5th Intern. IEEE Conference on Polymers and Adhesive in Microelectronics and Photonics, Wrocław 2005, 160.
- [50] Bin Su, *Electrical, thermomechanical and reliability; Modeling of electrically conductive adhesives*, Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, 2006.
- [51] Kijak J. (red). *Konstruowanie urządzeń elektronicznych*, WNT, Warszawa, 1975.
- [52] Matkowski P., Zawierta R., Felba J., *Vibration Response of Printed Circuit Board in Wide Range of Temperature. Characterization of PCB Materials*, 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, Brno 2009.
- [53] JEDEC standard JESD22-B111 *Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products*, 2003.
- [54] Dowhań Ł., Wymysłowski A., Felba J., Wiese S., Klaus-Jürgen Wolter K.-J., *Application of genetic algorithm in numerical multi-objective optimization of ceramic capacitors*, 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference, London-Greenwich, 2008, 377–382.
- [55] Liu J., Xia Zhang, Teng Wang, *Carbon Nanotubes as Cooling Fins in Microelectronic Systems*, 9th Nanotechnology Conference: IEEE NANO 2009, 10.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA

348107W/9

Dynamiczny rozwój funkcjonalności urządzeń elektronicznych wynika z osiągnięciem technologii wytwarzania i technik informatycznych. Funkcjonalne urządzenie elektroniczne powstaje jednak wtedy, gdy system połączeń pomiędzy elementami odpowiada zaprojektowanemu schematowi elektrycznemu, tak więc wykonanie i skuteczne funkcjonowanie urządzenia elektronicznego jest zależne między innymi od poprawnego wykonania połączeń elektrycznych na poziomie struktury półprzewodnikowej, między elementami struktury półprzewodnikowej i wyprowadzeniami jej obudowy, łączenia wyprowadzeń elementów w systemy elektroniczne, systemy w zespoły, a te w kompletne urządzenia. W tym celu stosuje się zwykle elementy pośrednie (np. obudowy, płytki obwodów drukowanych), specjalne materiały i technologie. Zagadnienia te stały się przedmiotem książki *Montaż w elektronice*.

Montaż w elektronice obejmuje szeroką wiedzę dotyczącą połączeń nierozłącznych (m.in. lutowanych, zgrzewanych, klejonych) i rozłącznych, a celem książki jest przedstawienie podstawowych informacji o tych zagadnieniach. Stosowane techniki połączeń i materiały są bardzo różne, co wynika z „hierarchiczności” poziomów montażu. Aby zrozumieć techniki łączenia, niezbędna jest wiedza o wyprowadzeniach/kontaktach elementów, obudowach stosowanych przez przemysł elektroniczny, wytwarzanych płytkach obwodów drukowanych i zasadach projektowania mozaiki pół lutowniczych na tych płytkach, a także wiedza o narażeniach i sposobach odprowadzania ciepła. Informacje zawarte w książce powinny również umożliwić samodzielne projektowanie zespołów przy uwzględnieniu zasad montażu.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w księgarni „Tech”
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-533-3