

Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Przemysław Krystian Matkowski

Termomechaniczna analiza złączy
mikroelektronicznych wykonanych przy zastosowaniu
bezołowiowych stopów lutowniczych

Promotor

Dr hab. inż. Jan Felba, prof. PWr

Wrocław, 2009

Moim Rodzicom oraz Dziadkom

za ich miłość, wsparcie i cierpliwość

Podziękowania:

Dr hab. inż. Jan Felba, prof. PWr,

Prof. Kazimierz Friedel,

Dr hab. Artur Wymysłowski, prof. PWr,

Dr inż. Barbara Bober,

Dr inż. Krzysztof Urbański,

Mgr inż. Zbigniew Żaluk,

Mgr inż. Rafał Zawierta,

Prof. Michael Pecht, Dr Sanka Ganesan (University of Maryland),

Prof. Bernd Michel, Dr Olaf Wittler,

Mgr S. Ali Mazloum-Nejadari

(Fraunhofer IZM Berlin),

Anna Girulska, Sylwia Herka

(ELDOS Sp. z o. o.),

Robert Kąkol (SONEL S.A.)

oraz liczne grono innych osób, które pomogły mi w realizacji niniejszej pracy.

Spis treści

1. Wstęp.....	7
2. Lutowanie bezołowiowe.....	12
2.1. Sprzęt elektryczny i elektroniczny w świetle aktów prawnych Unii Europejskiej oraz ustawodawstwa krajowego	12
2.2. Warunki materiałowe i technologiczne montażu elektronicznego wynikające z aktów legislacyjnych.....	14
2.2.1. Bezołowiowe stopy lutownicze.....	15
2.2.2. Temperatura lutowania.....	16
2.2.3. Topniki kompatybilne ze stopami bezołowiowymi.....	19
2.2.4. Bezołowiowe powłoki pól lutowniczych oraz wyprowadzeń elementów elektronicznych.....	21
2.3. Definicja niezawodności w odniesieniu do złączy lutowanych.....	24
3. Wytrzymałość mechaniczna złączy lutowanych, fazy międzymetaliczne.....	27
3.1. Wymagania stawiane złączom lutowanym.....	27
3.2. Przyczyny pękania złączy lutowanych w warunkach narażeń.....	28
3.3. Fazy międzymetaliczne.....	33
3.3.1. Kinetyka wzrostu faz międzymetalicznych.....	33
3.3.2. Kruche warstwy faz międzymetalicznych.....	38
3.3.3. Fazy międzymetaliczne cyny oraz metali szlachetnych formujące się w objętości lutu.....	40
3.3.4. Luki Kirkendalla w warstwach faz międzymetalicznych.....	41
3.4. Zjawisko łuszczenia warstw faz międzymetalicznych.....	43
3.5. Metody badania składu i struktury faz międzymetalicznych.....	45
4. Obiekty testów i program badań.....	52
4.1. Materiały i technologia wykonania testowych złączy lutowanych.....	52
4.1.1. Lutowanie rozpliwowe.....	52
4.1.2. Płytki obwodów drukowanych.....	55
4.1.3. Wybrane powłoki ochronne pól lutowniczych płytek obwodów drukowanych....	58
4.1.4. Wybrane stopy lutownicze.....	59
4.2. Program badań.....	61
4.3. Proces starzenia płytek testowych.....	63
5. Mikrostruktura złączy.....	65

5.1. Zgłady złączy lutowanych.....	65
5.2. Makroskopowe defekty złączy.....	66
5.3. Wpływ procesu starzenia oraz użytych materiałów na fazy międzymetaliczne.....	69
5.3.1. Złącza lutowane stopem SAC B na powłoce ochronnej ENIG.....	71
5.3.2. Złącza lutowane stopem SAC B na powłoce ImSn oraz HASL.....	77
5.3.3. Złącza lutowane stopem SN100C na powłoce ochronnej ENIG.....	80
6. Rezystancja złączy zawierających fazy międzymetaliczne.....	84
6.1. System pomiarowy.....	85
6.2. Procedura pomiarowa.....	92
6.3. Ocena stabilności rezystancji złączy lutowanych w zależności od zastosowanych stopów lutowniczych i powłok.....	93
7. Wytrzymałość mechaniczna połączeń.....	99
7.1. Połączenia mechaniczne.....	99
7.2. System pomiarowy.....	100
7.3. Wytrzymałość mechaniczna złączy.....	102
8. Niezawodność złączy lutowanych.....	107
8.1. Przyspieszone testy niezawodności złączy lutowanych.....	107
8.2. Współczynnik przyspieszenia efektu zmęczenia złączy lutowanych.....	111
8.3. Częstotliwość rezonansowa oraz odkształcenia płytek obwodów drukowanych poddawanych wibracjom.....	115
8.3.1. Mody odkształceń, rozkład Gaussa drgań losowych.....	115
8.3.2. Częstotliwość rezonansowa płytek testowych.....	117
8.3.3. Odkształcenia płytek testowych poddawanych wibracjom.....	120
8.3.4. Wpływ temperatury na odkształcenia płytek testowych poddawanych wibracjom.....	123
8.3.5. Wpływ temperatury na częstotliwość rezonansową testowych płytek obwodów drukowanych.....	127
8.4. Własne stanowisko badawcze.....	130
8.4.1. Istota szybkich, wielokanałowych pomiarów rezystancji złączy poddawanych przyspieszonym testom niezawodności, opis stanowiska.....	130
8.4.2. Wielokanałowy system diagnostyczno-pomiarowy.....	132
8.4.3. Konstrukcja i parametry systemu diagnostyczno-pomiarowego.....	134
8.4.4. Zasada działania algorytmu detekcji zdarzeń.....	138
8.4.5. Procedura implementacji algorytmu w strukturach FPGA.....	141

8.4.6. Komunikacja między systemem a komputerem.....	143
8.4.7. Problem połączenia okablowania pomiarowego z płytką testową poddawaną wibracjom losowym.....	145
8.5. Przyspieszone testy niezawodności złączy lutowanych.....	152
8.5.1. Procedura prowadzenia testów.....	152
8.5.2. Wyniki testów niezawodności złączy lutowanych.....	154
8.5.3. Rezystancja złączy stabilnych.....	157
8.5.4. Rezystancja złączy ulegających uszkodzeniu.....	157
8.5.5. Analiza procesu pęknięcia złączy na podstawie zarejestrowanych zmian ich rezystancji.....	159
8.5.6. Wpływ składu powłoki ochronnej na uszkodzenia testowanych złączy lutowanych	161
8.5.7. Wpływ stopu lutowniczego na uszkodzenia testowanych złączy lutowanych....	162
8.5.8. Wpływ faz międzymetalicznych uformowanych podczas procesów starzenia na wytrzymałość zmęczeniową testowanych złączy lutowanych.....	164
8.5.9. Ocena wpływu badanych czynników oraz ich interakcji na wytrzymałość zmęczeniową testowanych złączy lutowanych.....	165
8.5.10. Wnioski z przeprowadzonych testów niezawodności.....	168
9. Wnioski końcowe.....	171
Bibliografia.....	176

1 Wstęp

Dynamiczny rozwój elektroniki jest możliwy między innymi dzięki postępowi, jaki ciągle dokonuje się w zakresie materiałów, w stosowaniu ulepszonych procesów technologicznych oraz szerokiego wykorzystywania przy projektowaniu technik komputerowych. W efekcie uzyskuje się urządzenia elektroniczne o coraz wyższej funkcjonalności, mniejszych wymiarach i większej niezawodności. Jednym z czynników determinujących takie cechy sprzętu elektronicznego są procesy montażu elektronicznego – dziedzina wiedzy związana z czynnościami polegającymi na połączeniu w jeden element, podzespół lub zespół elektroniczny wielu oddzielnych struktur, modułów itp.

Pojecie montaż elektroniczny (montaż w elektronice) obejmuje bardzo szeroki zakres czynności i etapów technicznych, które prowadzą do zbudowania funkcjonalnego urządzenia. Pola kontaktowe struktury układu scalonego łączy się z końcówkami wyprowadzeń obudowy, obudowany układ montuje się na płycie obwodu drukowanego lub innym nośniku w celu połączenia go z pozostałym elementami zespołu. Zespoły łączy się ze sobą w funkcjonalne pojedyncze urządzenia elektroniczne. Tak powstałe bloki można dalej kompletować w duże urządzenia. Wszystkie te etapy montażu obejmują nie tylko połączenia mechaniczne i zamknięcie części funkcjonalnych w obudowie, ale wymagają spełnienia podstawowych

wymogów połączeń takich jak rozprowadzenie sygnałów elektrycznych oraz zasilania wewnątrz obudowy, a także rozwiązywanie problemu chłodzenia. Stosowane są różne techniki połączeń, takie jak zgrzewanie, lutowanie, klejenie i tworzenie złączy (np. rozłącznych). Ta różnorodność technologiczna oraz zróżnicowanie obszarów, w których techniki montażu są stosowane wymusiła stworzenie hierarchiczności poziomów montażu.

Zwykle przyjmuje się, że [1]:

- 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.
- Drugi poziom związany jest z montażem nieobudowanych i obudowanych układów scalonych, podzespołów biernych i mikrosystemów na płytkach obwodów drukowanych lub innych nośnikach.
- Trzeci poziom dotyczy montażu płytek obwodów drukowanych, gotowych mikrosystemów i innych podzespołów na poziomie bloku (kompletnego urządzenia elektronicznego).

Tematyka niniejszej pracy jest związana wyłącznie ze złączami lutowanymi wykonywanymi na drugim poziomie montażu.

Obowiązujące uregulowania prawne wyeliminowały powszechnie stosowany wcześniej bliskoeutektyczny stop lutowniczy cyna/ołów, co jest związane z wprowadzeniem zakazu stosowania ołowiu w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym - dla zwiększenia bezpieczeństwa pracy osób biorących udział w procesie montażu jak i demontażu oraz recyklingu w zakładach przetwarzania odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Coraz powszechniej używa się określenia „montaż bezołowiowy” lub bardziej precyzyjnie – montaż przy użyciu bezołowiowych stopów lutowniczych.

Prace badawcze nad poszukiwaniem bezołowiowych stopów lutowniczych, które mogłyby stanowić zamiennik dla stopu cyna/ołów rozpoczęły się w wielu krajach już na początku lat 90-tych ubiegłego stulecia. Prace te opierały się na założeniu, że możliwe będzie zastąpienie jednych stopów innymi. 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 różnicę stanowi temperatura lutowania, która dla większości bezołowiowych stopów lutowniczych jest przynajmniej o kilkanaście stopni wyższa i ponadto jest zależna od stosowanej technologii. Kilkuletnie doświadczenia ze stopami bezołowiowymi wykazały, że dostosowanie profilów temperaturowych urządzeń lutowniczych do powyższych wartości nie rozwiązało problemu pojawiających się wad montażu.

Występowanie różnego typu wad to dominujący problem montażu bezołowiowego. Wynika to z faktu, że jednocześnie wprowadzono kilka czynników technologicznych o dużej liczbie poziomów (a więc o istotnie różniących się właściwościach fizycznych i chemicznych), które dodatkowo silnie oddziałują wzajemnie. Ponadto, montaż bezołowiowy wymaga eliminacji ołowiu także z powłok na ścieżkach i polach lutowniczych płytek obwodów drukowanych – co wymusza stosowanie innych materiałów i nowych technologii nanoszenia tych powłok. Ten sam problem dotyczy wyprowadzeń elementów elektronicznych. Do rodzaju lutowanych powierzchni i rodzaju stopów lutowniczych należy dobrać odpowiednie pod względem technologicznym topniki, przy czym muszą one spełniać obowiązujące wymagania dotyczące ochrony środowiska. Istotną rolę odgrywa profil i zakres możliwych zmian temperatury procesu lutowania. Znaczenie może mieć też długość okresu naturalnego starzenia powłok, wprowadzane podczas procesów naprężenia mechaniczne i inne czynniki, których wpływ na wadliwość spoin może być trudny do przewidzenia. Rozwiązanie wszystkich problemów technologicznych prowadzących do właściwego wykonywania złączy lutowanych wymaga podejścia kompleksowego, zawartego w określeniu „elektronika bezołowiowa” (ang. Lead-free Electronics) [2], [3], [4].

Wady mogą powstawać bezpośrednio po procesie montażu (jak np. brak zwilżalności), ale są też defekty ograniczające niezawodność złączy, ujawniające się podczas eksploatacji urządzeń elektronicznych.

Celem pracy było wykazanie, że:

- Czynnikiem determinującym niezawodność bezołowiowych złączy lutowanych są fazy międzymetaliczne.
- Przez odpowiedni dobór materiałów można istotnie wydłużyć czas bezawaryjnej pracy bezołowiowych złączy lutowanych.

Cel ten realizowano przez przeprowadzenie wieloetapowych, kompleksowych badań

złączy lutowanych, których podstawy teoretyczne, przebieg oraz rezultaty opisano szczegółowo w kolejnych rozdziałach niniejszej rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiono wpływ restrykcyjnych przepisów dyrektywy RoHS (wprowadzonych w połowie bieżącej dekady) na technologię montażu podzespołów elektronicznych na płytkach obwodów drukowanych. Skoncentrowano się na głównych problemach technologicznych, wynikających z konieczności wprowadzenia bezołowiowych stopów lutowniczych do montażu podzespołów elektronicznych na płytkach obwodów drukowanych.

W rozdziale trzecim opisano kinetykę wzrostu oraz stosowane procedury badania składu i struktury faz międzymetalicznych. Wyszczególniono defekty faz międzymetalicznych zmniejszające wytrzymałość mechaniczną złączy lutowanych oraz przedstawiono przyczyny pęknięcia złączy w warunkach eksploatacji.

W rozdziale czwartym przedstawiono szczegółowo proces wytwarzania struktur testowych oraz procedurę badań. Przedstawiono procesy produkcji testowych płytek obwodów drukowanych oraz lutowania rozpliwowego prowadzone na liniach produkcyjnych dostępnych w firmach Eldos oraz Sonel. Przedstawiono stopy lutownicze oraz powłoki pół lutowniczych wybrane do badań na podstawie konsultacji przeprowadzonych z producentami sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Kryterium wyboru stanowiła dostępność materiałów oraz łatwość wdrożenia rezultatów badań do masowego montażu sprzętu. Złącza lutowane poddano procesom starzenia w celu stymulacji wzrostu nowych oraz rozrostu uformowanych faz międzymetalicznych, będących przedmiotem badań eksperymentalnych.

W rozdziale piątym przedstawiono procedurę badania faz międzymetalicznych, formujących się w badanych złączach lutowanych. Zgłady metalograficzne poddano inspekcji mikroskopowej, przeprowadzono ocenę struktur pod względem występowania defektów oraz przeprowadzono analizę jakościową i ilościową faz międzymetalicznych wybranych złączy. Określono wpływ procesów starzenia na strukturę i skład faz międzymetalicznych.

W rozdziale szóstym przedstawiono procedurę oraz rezultaty prac badawczych poświęconych ocenie długoterminowej stabilności rezystancji badanych złączy lutowanych. Opisano konstrukcję oraz zasadę działania systemu pomiarowego, zaprojektowanego i wykonanego w celu detekcji zmian rezystancji złączy poddawanych procesom starzenia. Automatyzacja pomiarów umożliwiła przeprowadzanie wielokrotnych pomiarów przy minimalnym zaangażowaniu badacza oraz zapewnia wysoką powtarzalność warunków

pomiaru. Zbadano wpływ stopów lutowniczych, powłok ochronnych oraz faz międzymetalicznych na wartość rezystancji złączy lutowanych.

W rozdziale siódmym przedstawiono procedurę oraz rezultaty badania wytrzymałości mechanicznej złączy lutowanych. Zbadano wpływ stopów lutowniczych, powłok ochronnych pól lutowniczych oraz faz międzymetalicznych na wytrzymałość złączy lutowanych poddawanych działaniu sił ścinających.

W rozdziale ósmym przedstawiono procedurę oraz rezultaty przyspieszonych testów niezawodności badanych złączy lutowanych. Przeprowadzono analizę odkształceń oraz wpływu temperatury na częstotliwość rezonansową badanych płytek obwodów drukowanych poddawanych drganiom losowym. Zaprezentowano nowatorski system diagnostyczno-pomiarowy, opracowany na potrzeby prowadzonych badań, umożliwiający detekcję zarówno szybkich jak i powolnych zmian rezystancji badanych złączy. Zbadano wpływ stopów lutowniczych, powłok ochronnych pól lutowniczych oraz faz międzymetalicznych na wytrzymałość zmęczeniową złączy lutowanych.

Prace nad ograniczeniem wad montażu elektronicznego przy stosowaniu bezołowiowych stopów lutowniczych prowadzone są przez wiele firm i laboratoriów naukowych całego świata. Także kilka ośrodków w Polsce podjęło prace nad tą tematyką. Zaowocowało to między innymi pojawieniem się opracowań monograficznych [5], [6] i rozpraw doktorskich [7]. Niniejsza praca wpisuje się w nurt prowadzonych badań, których celem jest opanowanie wiedzy o materiałach i technologiach lutowania bezołowiowego w montażu elektronicznym.

2 Lutowanie bezołowiowe

2.1 Sprzęt elektryczny i elektroniczny w świetle aktów prawnych Unii Europejskiej oraz ustawodawstwa krajowego

Z dniem 1 lipca 2006 roku na terenie państw członkowskich Unii Europejskiej zaczęła obowiązywać Dyrektywa 2002/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 stycznia 2003 roku w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym nazwana w skrócie RoHS [8]. Podstawą prawną dyrektywy RoHS jest art. 95 Traktatu ustanawiającego Wspólnotę Europejską.

Celem dyrektywy RoHS jest zbliżenie ustawodawstw państw członkowskich, dotyczących ograniczenia stosowania substancji niebezpiecznych w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym oraz przyczynienie się do ochrony zdrowia ludzi i przyjaznego dla środowiska odzysku i usuwania odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Zgodnie z art. 4 ust. 1 dyrektywy RoHS, państwa członkowskie miały obowiązek zapewnić, iż nowy sprzęt elektryczny i elektroniczny wprowadzany do obrotu po 1 lipca 2006 roku nie będzie zawierał ołowiu, kadmu, sześciowartościowego chromu, polibromowego difenyłu lub polibromowego eteru fenyloвого.

Dyrektywa RoHS jest ściśle powiązana z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady Europy nr 2002/96/WE z dnia 27 stycznia w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE - Waste Electrical and Electronic Equipment), która obowiązuje od sierpnia 2005 roku [9]. Dyrektywa WEEE ma na celu ochronę środowiska naturalnego przez ograniczenie odpadów elektrycznych i elektronicznych przedostających się do środowiska oraz odzyskanie jak największej ich części w ramach zorganizowanych systemów gospodarowania zużytym sprzętem [10], [11], [12], [13].

Zgodnie z art. 2 ust. 1 dyrektywy RoHS, ten akt legislacyjny stosuje się do sprzętu elektrycznego i elektronicznego zaliczającego się do następujących kategorii wymienionych w załączniku IA do dyrektywy 2002/96/WE (WEEE):

- wielkogabarytowych urządzeń gospodarstwa domowego,
- małogabarytowych urządzeń gospodarstwa domowego, sprzętu teleinformatycznego i telekomunikacyjnego,
- sprzętu konsumenckiego,
- sprzętu oświetleniowego,
- narzędzi elektrycznych i elektronicznych (z wyjątkiem wielkogabarytowych, stacjonarnych narzędzi przemysłowych),
- zabawek, sprzętu rekreacyjnego i sportowego,
- automatów do wydawania.

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

Zgodnie z art. 2 ust. 2 dyrektywy RoHS, stosuje się ją bez uszczerbku dla prawodawstwa krajów Unii Europejskiej dotyczącego bezpieczeństwa oraz wymagań zdrowotnych. Oznacza to, że wyroby medyczne oraz przyrządy kontroli i nadzoru są wyłączone z zakresu obowiązywania przepisów dyrektywy RoHS. Dodatkowo, zgodnie z art. 2 ust. 3, dyrektywy RoHS nie stosuje się do części zapasowych do naprawy lub ponownego wykorzystania sprzętu elektrycznego i elektronicznego wprowadzonego do obrotu przed dniem 1 lipca 2006 roku.

Dyrektywa RoHS jest prawomocna na terenie państw członkowskich UE i przedstawia cele, jakie mają zostać osiągnięte, pozostawiając państwom członkowskim swobodę

w kwestii sposobu wcielenia przepisów w ich lokalnym systemie prawnym. Dyrektywy adresowane do państw członkowskich nie nadają praw, ani nie nakładają obowiązków na obywateli Unii Europejskiej. Prawa oraz obowiązki nałożone na obywateli poszczególnych państw członkowskich wynikają tylko i wyłącznie z przepisów, którym moc prawną nadały władze poszczególnych państw członkowskich. W Polsce stosownym aktem prawnym odnoszącym się do dyrektywy RoHS jest Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 6 października 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących ograniczenia stosowania w sprzęcie elektronicznym i elektrycznym niektórych substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko oraz późniejsze rozporządzenia [14], [15], [16].

2.2 Warunki materiałowe i technologiczne montażu elektronicznego wynikające z aktów legislacyjnych

Wejście w życie dyrektywy RoHS wymusiło na producentach sprzętu elektrycznego i elektronicznego wyeliminowanie ze składu produkowanych urządzeń substancji uznanych za niebezpieczne. W grupie substancji wymienionych w dyrektywie jako niebezpieczne znalazł się między innymi ołów, od wielu lat powszechnie stosowany jako składnik stopów lutowniczych.

Celem wprowadzenia zakazu stosowania ołowiu w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym jest zwiększenie bezpieczeństwa pracy osób biorących udział w procesie montażu jak i demontażu oraz recyklingu odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Szczególnie szkodliwe dla zdrowia człowieka są opary ołowiu, których długotrwałe działanie może mieć nieodwracalne skutki w postaci uszkodzenia centralnego systemu nerwowego, zahamowania wytwarzania hemoglobiny oraz osłabienia zdolności reprodukcyjnych [17].

Także poza państwami Unii Europejskiej podejmuje się działania zmierzające do zakazu stosowania materiałów niebezpiecznych. Wprawdzie na terenie Stanów Zjednoczonych nie ma regulacji prawnych dotyczących zakazu stosowania ołowiu w sprzęcie elektrycznym oraz elektronicznym, czy też regulacji prawnych dotyczących zagospodarowania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (np. poziomy zbiórki, odzysku i recyklingu), ale mimo to wielu amerykańskich producentów sprzętu elektrycznego i elektronicznego stosuje bezołowiowe stopy lutownicze w celach marketingowych. Producenci reklamując produkowany sprzęt jako przyjazny dla środowiska dążą do zwiększenia konkurencyjności produkowanych urządzeń, a tym samym zwiększenia udziału w rynku światowym [18]. W USA instytucją zaangażowaną w ograniczenie stosowania ołowiu jest Environmental Protection Agency (EPA) [19]. W Japonii Parlament na wniosek Ministerstwa Handlu (MITI)

wydał ustawę podobną do europejskiej Dyrektywy WEEE, obowiązującą od 1 kwietnia 2001 [20]. W Japonii nie ma regulacji prawnych dotyczących zakazu stosowania ołowiu w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym.

W przypadku technologii montażu podzespołów elektronicznych na płytkach obwodów drukowanych wprowadzenie zakazu stosowania ołowiu w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym skutkowało koniecznością:

- zastąpienia dotychczas stosowanych stopów lutowniczych zawierających ołów bezołowiowymi stopami lutowniczymi,
- zwiększenia temperatury lutowania ze względu na wyższą temperaturę topnienia bezołowiowych stopów lutowniczych,
- przystosowania linii montażowych do lutowania w wyższej temperaturze,
- przystosowania montowanych elementów do montażu w wyższej temperaturze,
- zastosowania nowych topników, które umożliwiają prawidłowe zwilżanie lutowanych powierzchni stopami lutowniczymi o wyższym napięciu powierzchniowym,
- przystosowania powłok pól lutowniczych oraz wyprowadzeń elementów do lutowania w wyższych temperaturach i przy zastosowaniu stopów o wyższym napięciu powierzchniowym [21].

2.2.1 Bezołowiowe stopy lutownicze

W ciągu kilkunastu ostatnich lat w wielu ośrodkach naukowo-badawczych prowadzone były zakrojone na szeroką skalę badania nad składem bezołowiowych stopów lutowniczych, mających zastąpić stopy z dużą zawartością ołowiu. Liczbę samych tylko stopów bezołowiowych do montażu sprzętu elektrycznego i elektronicznego, zarejestrowanych w biurach patentowych, szacuje się na ponad 340 [2]. Spośród tych propozycji światowe konsorcja wytypowały zalecane stopy bezołowiowe przeznaczone do lutowania rozpliwowego, lutowania zanurzeniowego na fali oraz lutowania ręcznego. Stopy lutownicze zalecane przez czołowe konsorcja zajmujące się lutowaniem umieszczono w tabeli 2.1.

Angielskie Centrum Badawcze SOLDERTEC [22], które było pierwszym na świecie centrum technologii lutowania bezołowiowego, zaleca stosowanie stopów lutowniczych Sn(3,4-4,1)Ag(0,45-0,9)Cu do lutowania rozpliwowego i lutowania na fali. Również Europejskie Konsorcjum pod kierunkiem GEC-Marconi uznało, iż optymalnymi stopami

bezołowiowymi są trójskładnikowe stopy oparte na cynie, srebrze oraz miedzi (potocznie określane skrótem SAC, pochodzącym od pierwszych liter symboli pierwiastków wchodzących w skład stopu). W oparciu o zrealizowany projekt IDEALS Europejskie Konsorcjum zaleca stop $\text{Sn}_{3,8}\text{Ag}_{0,7}\text{Cu}$ do ogólnego zastosowania oraz stop $\text{Sn}_{3,8}\text{Ag}_{0,7}\text{Cu}_{0,5}\text{Sb}$ i ewentualnie stop SnAgBi do lutowania na fali.





Konsorcjum	Technologia	Lutowanie na fali	Lutowanie rozpliwowe
SOLDERTEC		$\text{Sn}_{3,8}\text{Ag}_{0,25}\text{Cu}$	$\text{Sn}_{3,8}\text{Ag}_{0,7}\text{Cu}$
IDEALS		$\text{Sn}_{(3,4-4,1)}\text{Ag}_{(0,45-0,9)}\text{Cu}$	
JEITA		$\text{Sn}_{3,0}\text{Ag}_{0,25}\text{Cu}$	
NEMI		$\text{Sn}_{0,7}\text{Cu}$	$\text{Sn}_{3,9}\text{Ag}_{0,6}\text{Cu}$

Tabela 2.1: Bezołowiowe stopy lutownicze zalecane przez światowe konsorcja [18].

Japońskie stowarzyszenie do spraw rozwoju przemysłu elektronicznego JEIDA (ang. Japan Electronic Industries Development Association) [23] zaleca stop $\text{Sn}_{3,0}\text{Ag}_{0,5}\text{Cu}$ zarówno do lutowania rozpliwowego jak i lutowania na fali. Badania prowadzone przez JIEP (Japan Institute of Electronics Packaging) oraz NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) miały na celu znalezienie uniwersalnego bezołowiowego stopu lutowniczego oraz standardowych warunków lutowania. Stwierdzono, że najbardziej perspektywicznymi bezołowiowymi stopami lutowniczymi są stopy SAC i SnAgBi [18].

Organizacja amerykańskich producentów elektroniki NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative) na podstawie zrealizowanego projektu „Lead-Free Assembly Project” zaleca stosowanie stopu $\text{Sn}_{3,9}\text{Ag}_{0,6}\text{Cu}$ do lutowania rozpliwowego oraz $\text{Sn}_{0,7}\text{Cu}$ do lutowania na fali [18].

Jak widać z przytoczonego przeglądu rekomendacji stosowania bezołowiowych stopów lutowniczych na szczycie długiej listy najczęściej plasują się stopy SAC. Jednak jak wykazują zalecenia konsorcjów, dotychczas nie wytypowano uniwersalnego stopu SAC, który znalazłby zastosowanie zarówno w procesie lutowania rozpliwowego, lutowania na fali czy też lutowania ręcznego.

2.2.2 Temperatura lutowania

Jednym z głównych parametrów fizycznych stopów lutowniczych decydującym o przydatności do montażu, jest temperatura topnienia stopów eutektycznych lub temperatura

całkowitego topnienia stopu nieeutektycznego (tzw. temperatura liquidus).

Wśród opatentowanych i zalecanych do stosowania bezołowiowych stopów lutowniczych znajdują się zarówno stopy eutektyczne jak i nieeutektyczne, dla których między temperaturą liquidus, a temperaturą solidus występuje tzw. zakres ciastowatości lutu. Temperatury lutowania wybranych stopów lutowniczych zamieszczono w tabeli 2.2 [5], [24]. Należy podkreślić, że temperatura procesu lutowania musi być wyższa od przytoczonych w tabeli wartości temperatur topnienia (stopy eutektyczne) oraz temperatur liquidus (stopy nieeutektyczne).

Stop lutowniczy		Temperatura [°C]	
Skład	Nazwa skrócona	Solidus	Liquidus
Sn37Pb	Sn63Pb	183	
Bi42Sn	Bi58A	138	
Sn3Ag0,4Cu	Cu0,4	217	
Sn3Ag0,5Cu	SAC3	217	219
Sn3Ag0,7Cu	Cu0,7	217	
SnCu0,7Ni	SN100C	227	
Sn4Ag	Sn96A	221	
Sn5Ag	Sn95E	221	245
Sn5Sb	Sb05A	235	240

Tabela 2.2: Temperatura topnienia wybranych stopów lutowniczych [5], [24]

Pod względem temperatury topnienia bezołowiowe stopy lutownicze można podzielić na [6]:

- stopy niskotemperaturowe o temperaturze lutowania poniżej 180°C,
- stopy o temperaturach topnienia zbliżonych do temperatury topnienia stopu eutektycznego SnPb (tabela 2.3),

Układ	Skład w % wagowych	Temperatura topnienia (°C)
Sn-Bi-Zn	Sn8Zn3Bi	189-199
Sn-Bi-In	Sn20Bi10In	143-193

Tabela 2.3: Stopy lutownicze o temperaturach topnienia zbliżonych do temperatury topnienia eutektyki SnPb

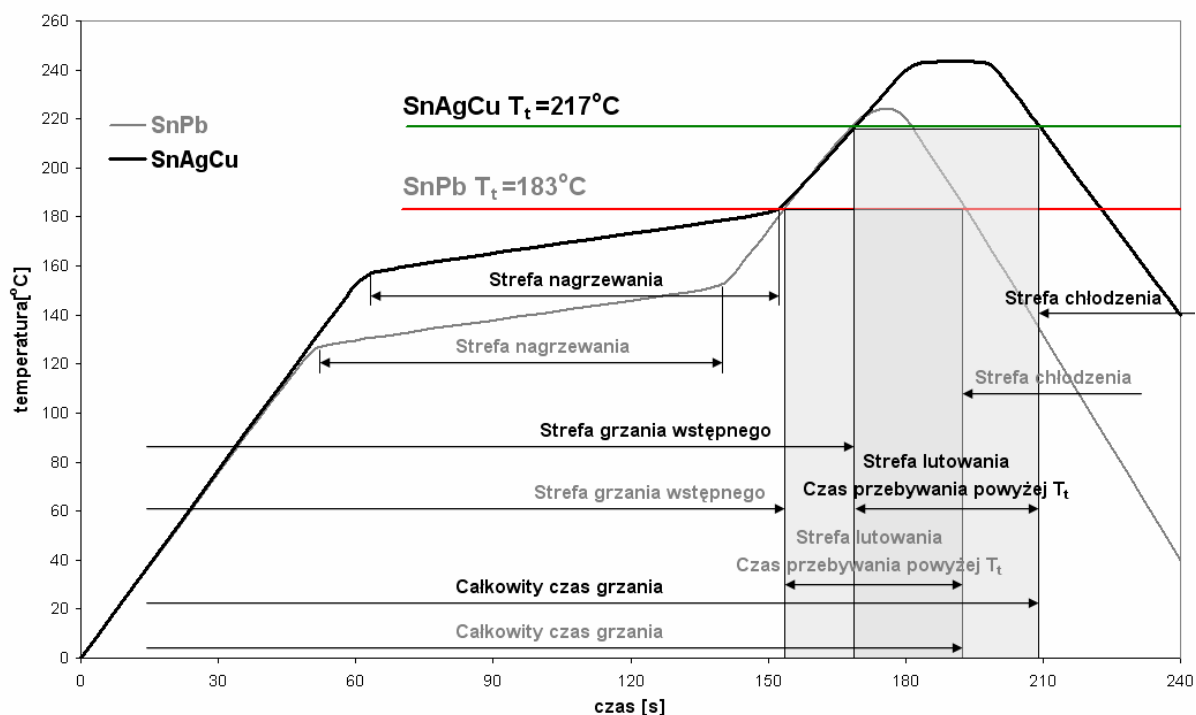
- stopy o średnich temperaturach topnienia, mieszczących się w zakresie 200–230°C,

- stopy wysokotemperaturowe o temperaturze lutowania powyżej 230°C.

Większość bezołowiowych stopów lutowniczych przeznaczonych do produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego powszechnego użytku należy do grupy spoiw o średniej temperaturze topnienia [18]. Temperatura topnienia tych stopów jest średnio o około 35 stopni wyższa od temperatury topnienia dotychczas używanego eutektycznego stopu SnPb.

Wyższa temperatura topnienia możliwego do użycia stopu lutowniczego wymusiła konieczność prowadzenia procesu lutowania w odpowiednio wyższej temperaturze. W pierwszej kolejności konieczne było przystosowanie dotychczasowych linii montażowych do nowych warunków pracy. Zmiana najważniejszego parametru procesu lutowania wymusiła dodatkowo zmianę pozostałych parametrów procesu np. temperatury i czasu wygrzewania wstępnego, czasu przebywania w temperaturze powyżej temperatury topnienia, szybkości chłodzenia zespołów po lutowaniu.

Przy lutowaniu rozplýwowym podwyższenie temperatury topnienia stopu wymusiło zmianę temperatury i czasu trwania kolejnych faz procesu. Zmiany charakterystyki temperaturowo-czasowej – tzw. profilu temperaturowego - procesu lutowania rozplýwowego wynikające z zastosowania stopu lutowniczego o wyższej temperaturze topnienia pokazano na rysunku 2.1.



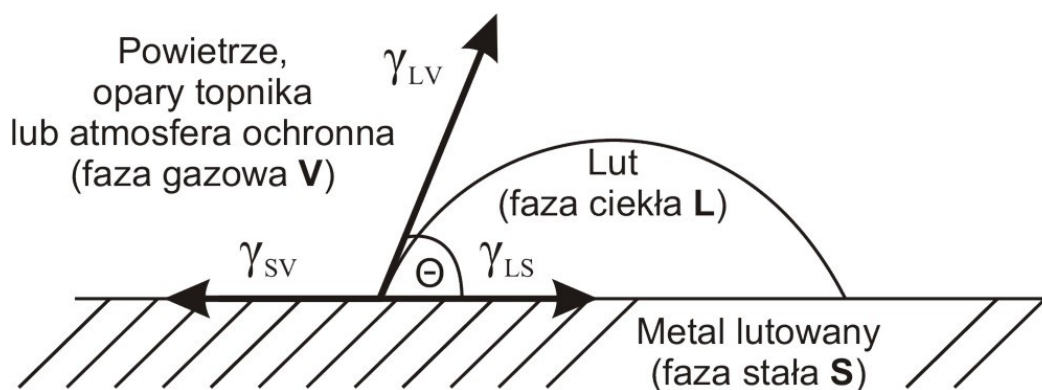
Rysunek 2.1: Zmiany charakterystyki temperaturowo-czasowej wynikające z wyższej temperatury topnienia bezołowiowego stopu lutowniczego [5]

W praktyce zmianę charakterystyki temperaturowo-czasowej procesu lutowania rozplwowego w piecach wielostrefowych uzyskuje się przez zmianę prędkości przemieszczania lutowanych płytek obwodów drukowanych w poszczególnych strefach oraz zmianę temperatury poszczególnych stref pieca.

2.2.3 Topniki kompatybilne ze stopami bezołowiowymi

Jednym z warunków uformowania się prawidłowego złącza podczas procesu lutowania elementów na powierzchniach pól lutowniczych jest zwilżenie pól lutowniczych i wyprowadzeń podzespołów przez ciekły lut. Warunkiem dobrego zwilżania jest to, aby siły wzajemnego przyciągania między cząsteczkami ciekłego lutu a cząsteczkami na powierzchni lutowanych metali były większe od sił spójności między cząsteczkami ciekłego lutu. Siły wzajemnego przyciągania prowadzą do tworzenia się faz międzymetalicznych, wobec czego można też powiedzieć, że warunkiem zwilżenia jest utworzenie fazy międzymetalicznej na granicy fazowej metal lutowany – ciekły lut. W procesie lutowania bierze udział lut (stop metali), podłoże (metal lutowany), topnik i atmosfera otoczenia złącza, w której proces się odbywa (próżnia, powietrze, opary topnika lub atmosfera ochronna).

W temperaturze lutowania lut jest w stanie ciekłym, metal bazowy pozostaje w stanie stałym, natomiast topnik przechodzi w stan gazowy. Schemat termodynamicznej równowagi układu podczas lutowania zaprezentowano na rysunku 2.2.



Rysunek 2.2: Schemat termodynamicznej równowagi procesu zwilżania

Stan równowagi termodynamicznej takiego układu opisuje równanie Younga:

$$\gamma_{SV}^{\vec{}} + \gamma_{LS}^{\vec{}} + \gamma_{LV}^{\vec{}} = 0 \quad , \quad (2.1)$$

w którym:

$\gamma_{SV}^{\vec{}}$ - napięcie powierzchniowe na powierzchni międzyfazowej metal lutowany – gaz,

$\vec{\gamma}_{LS}$ - napięcie powierzchniowe na powierzchni międzyfazowej ciekły lut – metal lutowany,

$\vec{\gamma}_{LV}$ - napięcie powierzchniowe na powierzchni międzyfazowej ciekły lut – gaz.

Uwzględniając wykres sił zaprezentowany na rys. 2.2 równanie Younga można przekształcić do następującej postaci:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad , \quad (2.2)$$

w którym:

γ_{LV} - siła powodująca rozplływ cieczy po powierzchni ciała stałego (siła zwilżania).

W związku z krótkim czasem lutowania i natychmiastowym ochłodzeniem lutowanych elementów, podczas procesu lutowania rzadko zachodzi rozpatrywany przypadek równowagi termodynamicznej. Oceny stopnia zwilżenia powierzchni można dokonać zatem analizując kąt dwuścienny θ . Kąt θ mniejszy od 75° wskazuje na zwilżenie. Najlepsze zwilżenie osiąga się, gdy kąt θ zawarty jest między 0 a 25° [5], [6].

Bezołowiowe stopy lutownicze cechuje wyższa wartość napięcia powierzchniowego (na powierzchni międzyfazowej ciekły lut – gaz) w porównaniu do stopów zawierających ołów i w konsekwencji gorsze zwilżanie powierzchni pól lutowniczych. Obniżenie kąta zwilżania, a tym samym polepszenie zwilżalności pól lutowniczych jest możliwe przez zastosowanie topników wpływających na wartość napięcia międzyfazowego między ciekłym lutem a fazą gazową [5], [6]. Topniki oprócz zwiększania płynności lutu przez obniżenie napięcia powierzchniowego ciekłego lutu ułatwiają lutowanie przez chemiczne oczyszczanie lutowanych powierzchni z tlenków i innych zanieczyszczeń np. zanieczyszczeń jonowych oraz zapobiegają powstawaniu nowych tlenków podczas lutowania przez odcięcie kontaktu z powietrzem.

W chwili obecnej opracowywanie nowych topników koncentruje się głównie na przyjaznych środowisku naturalnemu topnikach wodnych nie zawierających organicznych substancji lotnych tzw. „VOC-free” (Volatile Organic Compounds). Topniki wodne są topnikami, które nie wymagają usuwania po przeprowadzonym procesie montażu, określa się je mianem topników „no clean”. Ponieważ głównymi tlenkami zarówno w przypadku stopów bezołowiowych jak i Sn37Pb są tlenki cyny, więc dotychczasowe topniki uważa się za wystarczająco skuteczne także w procesie lutowania przy wykorzystaniu stopów bezołowiowych [25].

2.2.4 Bezołowiowe powłoki pól lutowniczych oraz wyprowadzeń elementów elektronicznych

Na jakość złącza lutowanego istotnie wpływa obecność powłok ochronnych pól lutowniczych oraz wyprowadzeń elementów elektronicznych. Powłoki zapobiegają procesowi utleniania miedzi w czasie między wykonaniem płytki obwodów drukowanych lub elementu a montażem elementu na płytce, zapewniają dobrą zwilżalność powierzchni podczas procesu lutowania. Ponadto powłoki zabezpieczają pozostałe elementy mozaiki przewodzącej (ścieżki przewodzące, otwory metalizowane) przed utlenieniem, zapobiegają rozpuszczeniu się miedzi w stopach lutowniczych oraz biorą udział w formowaniu faz międzymetalicznych na granicy między stopem lutowniczym a polem lutowniczym, czy też wyprowadzeniem elementu. Fazy międzymetaliczne formujące się na granicy międzyfazowych materiałów złącza mogą mieć decydujący wpływ na właściwości elektryczne i mechaniczne złączy lutowanych. Dodatkowo, rozpuszczanie się metali powłok w ciekłym lucie zmienia zasadniczo mikrostrukturę złącza i jego właściwości fizyczne.

W niestosowanej już technologii lutowania przy wykorzystaniu stopów zawierających ołów najczęściej używaną metodą zabezpieczenia miedzianej mozaiki przewodzącej było pokrywanie jej warstwą bliskoeutektycznego stopu SnPb metodą HASL (ang. Hot Air Solder Leveling). Metoda HASL polega na nakładaniu powłoki metodą zanurzania płytki obwodu drukowanego w topniku a następnie w ciekłym lucie oraz wyrównaniu powłoki stopu lutowniczego przez usuwanie nadmiaru ciekłego lutu strumieniem gorącego powietrza. Główną wadą powłok nakładanych metodą HASL jest brak koplanarności [25].

Postępująca miniaturyzacja elementów czynnych przy jednoczesnym wzroście ich funkcjonalności wymusiła zwiększenie liczby wyprowadzeń elektrycznych i w konsekwencji - wzrost gęstości upakowania, co skutkuje zmianami w technikach montażu elektronicznego. Na przykład, powszechnie stosowane elementy w obudowach z wyprowadzeniami sferycznymi w siatce rastrowej (BGA - ang. Ball Grid Array) wymagają dokładniejszych powłok pól lutowniczych niż te, które nakładane są metodami HASL. Z tego powodu wprowadzono powłoki złota na warstwie niklu, pokrycia organiczne oraz pokrycia cynowe, nakładane metodą chemiczną, co zapewnia wymaganą koplanarność powierzchni pól lutowniczych [5].

W montażu powierzchniowym, przy stosunkowo dużych polach lutowniczych w dalszym ciągu stosuje się metodę HASL, oczywiście nakładając powłoki, które nie zawierają ołowiu. Metoda jest stosunkowo tania, a nakładane powłoki zapewniają szybsze zwilżanie niż

powłoki metaliczne nakładane chemicznie, czy też pokrycia organiczne. Niestety w przypadku bezołowiowych stopów lutowniczych zbyt wysoka temperatura procesu nakładania może powodować deformację płytek obwodów drukowanych, a nawet rozwarstwienie laminatu. Dodatkowo stosowanie powłok nakładanych metodą HASL przyczynia się do zwiększenia zanieczyszczenia płytek wskutek konieczności stosowania aktywnych topników, co wymaga mycia po procesie nakładania powłoki.

Stopy bezołowiowe poprawnie zwilżają powierzchnie miedzi pokryte powłokami organicznymi (OSP - ang. Organic Solderability Preservatives). Wadą powłok OSP jest ich krótki czas przechowywania, niewystarczająca ochrona w przypadku stosowania topników „no clean”, szybka degradacja po kolejnych procesach cieplnych (np. po kilkukrotnym lutowaniu rozplwowym lub po jednokrotnym lutowaniu rozplwowym, utwardzaniu kleju i wstępnym wygrzewaniu przed lutowaniem na fali) oraz uniemożliwienie montażu drutowego „chip-on-board”. Ich zaletą jest niska cena, łatwość nakładania oraz minimalne zanieczyszczenia jonowe. W przypadku zastosowania bardziej aktywnego topnika zapewniają dość dobrą zwilżalność pól lutowniczych przez ciekły lut [25]. Generalnie jednak stopy bezołowiowe znacznie lepiej zwilżają powierzchnie pokryte powłokami metalicznymi zawierającymi np. cynę, srebro, pallad czy też złoto naniesione na warstwę niklu.

Obok wspomnianej wcześniej metody HASL powłoki metaliczne są nanoszone metodami galwanicznymi lub chemicznymi. Powłoki nakładane chemicznie (immersyjnie) charakteryzuje niewielki koszt, doskonała koplanarność oraz skuteczność ochrony pól lutowniczych przed utratą lutowności. Wadą jest ich niewielka grubość (np. 0,5 – 1 μm w przypadku cyny), co może sprzyjać dyfuzji miedzi ku powierzchni powłoki, jej utlenieniu i pogorszeniu lutowności. Wadą powłoki cyny immersyjnej jest podatność na wzrost kryształów nitkowych (tzw. wiskersów) oraz na formowanie kruchych faz międzymetalicznych. Podczas procesu lutowania cienka powłoka może szybko przekształcić się na całej grubości w fazę międzymetaliczną.

Zaletą powłok złota immersyjnego na warstwie niklu nakładanego metodą bezprądową - ENIG (ang. Electroless Nickel Immersion Gold) a także powłok Ni/Pd/Au jest ich koplanarność, stabilność w podwyższonej temperaturze oraz odporność na utlenianie. Ich wadami są wysoka cena oraz podatność na występowanie wad w postaci porowatego złota, kruchego złota i tzw. czarnego niklu [5], [6].

Jeżeli atomy złota nie tworzą na powierzchni niklu ścisłej sieci, to w takich warunkach

nikiel przedostanie się na powierzchnię przez porowate złoto. Nikiel wystawiony na działanie powietrza podlega procesowi utleniania, a powłoka staje się nielutowana. Powodem braku lutowności powłoki ENIG może być również wadliwie prowadzony proces chemicznego nakładania Au, polegający na zbyt długim czasie upływającym od nałożenia Ni do nakładania Au, który pozwala na utlenienie się Ni przed nałożeniem Au. Czas ten nie powinien być dłuższy niż 1,5 min.

Efekt kruchego złota występuje w warunkach, gdy wewnątrz lutu tworzą się warstwy związku metalurgicznego $AuSn_4$ zwanego θ -fazą.

Czarne pola powodujące powstawanie wad w złączach lutowanych są konsekwencją nieprawidłowo przeprowadzonego procesu kąpieli do nakładania powłoki niklu, oraz pozostawiania fosforu po jej nałożeniu. Nadmiar fosforu w kąpieli niklującej prowadzi do pogorszenia lutowności, natomiast jego niedomiar prowadzi do pogorszenia przyczepności warstwy [5], [6].

Najczęściej używanymi obecnie powłokami metalicznymi są:

- Powłoka ENIG Au/Ni(P). Warstwa niklu nie ulega rozpuszczaniu w ciekłym lucie i stanowi barierę dyfuzyjną miedzi do złota. Przeciętna grubość powłoki złota wynosi 0,07 – 0,12 μm , natomiast niklu - 4-6 μm . Cienka warstwa Au rozpuszcza się w ciekłym lucie całkowicie i lutowanie następuje do warstwy Ni, co sprawia, że warstwa ta musi być dobrze zwilżana przez ciekły lut. Dodatek fosforu w warstwie niklu ma zapewnić właściwą lutowność.
- Powłoki nakładane metodą HASL oparte na stopie SnCu lub SnAgCu. W temperaturze lutowania powłoki topią się a następnie stapiają z lutem tworząc metalurgiczne połączenie między lutem a materiałem podłoża. Przeciętna grubość powłoki wynosi 5-20 μm .
- Powłoka cyny immersyjnej (ImSn) nakładanej metodami chemicznymi. Powłoka cyny immersyjnej podobnie jak powłoka srebra, czy też złota immersyjnego, nie topi się w temperaturze lutowania, ale ulega rozpuszczeniu w ciekłym lucie tworząc fazy międzymetaliczne. Przeciętna grubość powłoki wynosi 0,8-1,2 μm .
- Powłoka srebra immersyjnego (ImAg), która jest dość często stosowana.

Podczas dokonywania wyboru powłoki należy kierować się kosztem procesu, kompatybilnością z bezołowiowymi stopami lutowniczymi oraz niezawodnością uzyskanych

złączy.

2.3 Definicja niezawodności w odniesieniu do złączy lutowanych

Pojęcie niezawodności należy rozumieć jako przewidywalną zdolność do realizacji określonych zadań w określonych warunkach i określonym przedziale czasowym. Modelem matematycznym niezawodności jest nieujemna, ciągła zmienna losowa T nazywana czasem zdatności lub trwałości obiektu i określająca czas poprawnej pracy obiektu. Do opisu czasu zdatności stosuje się rozkłady prawdopodobieństwa uszkodzeń w funkcji czasu $f(t)$. Rozkład prawdopodobieństwa $f(t)$ opisuje prawdopodobieństwo P uszkodzenia obiektu w przedziale czasu $[t, \Delta t]$ jako:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.3)$$

W dziedzinie montażu elektronicznego, w celu ilościowej analizy niezawodności przyjmuje się najczęściej, że czas poprawnej pracy obiektu t można opisać uogólnionym rozkładem wykładniczym, określanym jako rozkład Weibulla [26].

Prawdopodobieństwo, że obiekt ulegnie uszkodzeniu do czasu t można wyznaczyć za pomocą dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa $F(t)$, która w przypadku rozkładu Weibulla przyjmuje postać:

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta}, \quad (2.4)$$

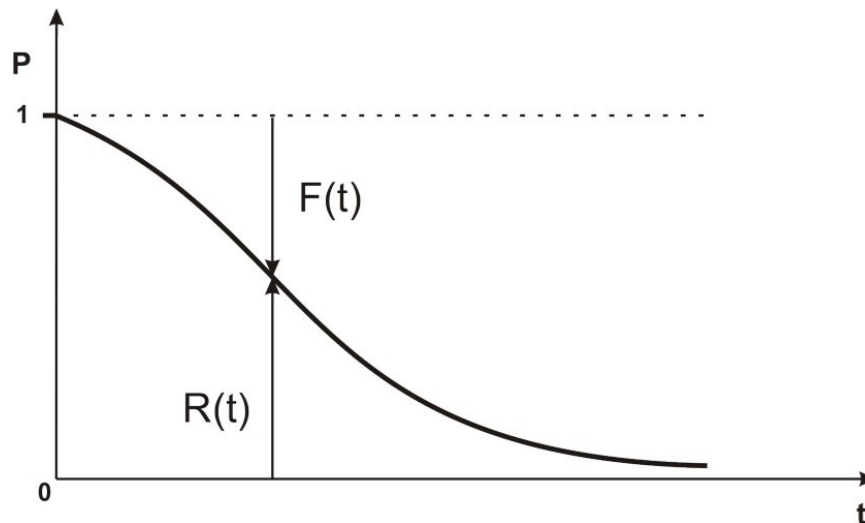
w którym:

β, λ – parametry rozkładu Weibulla.

Prawdopodobieństwo, że obiekt będzie pracował poprawnie przez czas t zwane funkcją niezawodności $R(t)$ lub niezawodnością obiektu w przypadku rozkładu Weibulla opisane jest zależnością:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta} \quad (2.5)$$

Przykładowy wykres prawdopodobieństwa uszkodzenia $F(t)$ oraz niezawodności obiektu $R(t)$ obiektu przedstawiono na rysunku 2.3.



Rysunek 2.3: Prawdopodobieństwo uszkodzenia $F(t)$ oraz niezawodność $R(t)$ obiektu w funkcji czasu

Złącza lutowane mają za zadanie nie tylko stanowić połączenie elektryczne o możliwie jak najlepszej przewodności elektrycznej, ale również wydajnie odprowadzać ciepło i pełnić funkcję konstrukcyjną. Warunki, w których wyżej wymienione zadania powinny być realizowane zależą w głównej mierze od przeznaczenia sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Warunki pracy urządzeń to przede wszystkim oddziaływanie czynników środowiskowych, takich jak temperatura otoczenia i jej zmiany, wilgotność względna, ciśnienie, skład chemiczny atmosfery, obecność i natężenie promieniowania, czy też szoki termiczne. Na pracę urządzeń mogą mieć także wpływ narażeniowe czynniki mechaniczne (np. wibracje, naprężenia, udary), a także narażenia eksploatacyjne (np. poziom natężenia prądu). Czas zdatności złączy lutowanych do pełnienia ich funkcji powinien uwzględniać zatem wpływ wszystkich czynników narażeniowych wynikających z warunków pracy wyrobu finalnego, jak i uwarunkowań ekonomicznych.

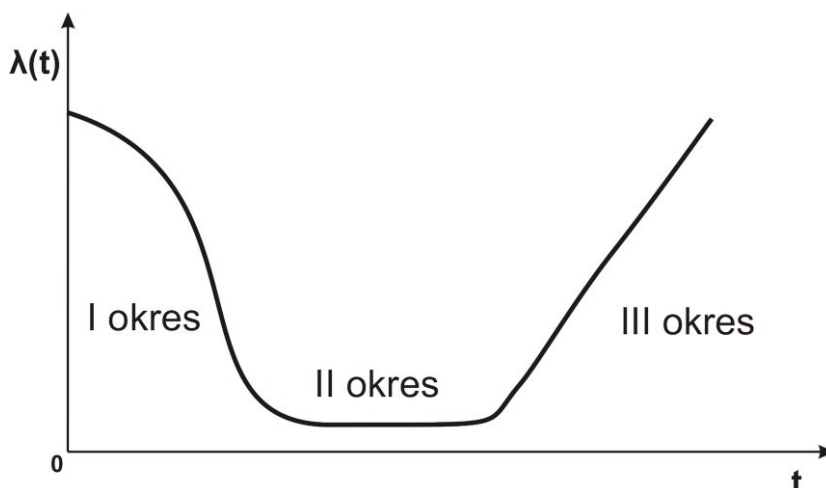
Istotnym parametrem oceny niezawodności jest średni czas do wystąpienia awarii (MTTF, ang. Mean Time To Failure). Określa on w przybliżeniu jaki czas powinien minąć zanim wystąpi uszkodzenie. Z punktu widzenia poprawy niezawodności, średni czas do wystąpienia awarii powinien być możliwie jak najdłuższy. Równie istotnym parametrem jest średni czas między awariami (MTBF, ang. Mean Time Between Failure). Parametr jest użyteczny przy określaniu czasu, jaki upłynie między uszkodzeniami w początkowym okresie eksploatacji wynikającymi np. z procesu produkcji a uszkodzeniami wynikającymi ze zużycia zmęczeniowego urządzeń.

Kolejnym istotnym parametrem jest intensywność uszkodzeń. Intensywność uszkodzeń

można wyznaczyć z zależności:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.6)$$

Przykładowy wykres funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ np. urządzeń elektronicznych pokazano na rysunku 2.4. Ze względu na charakter zmian intensywności uszkodzeń w funkcji czasu wykres można podzielić na trzy przedziały czasowe.



Rysunek 2.4: Intensywność uszkodzeń w funkcji czasu

Na początku eksploatacji urządzeń intensywność uszkodzeń jest relatywnie wysoka, ze względu na ujawnianie się wad wynikających z błędów montażu urządzeń elektronicznych (np. niedostateczna zwilżalność pól lutowniczych przez ciekły lut). Wraz z upływem czasu liczba ujawniających się wad wynikających z defektów montażowych maleje, w związku z czym zmniejsza się intensywność uszkodzeń.

Podczas drugiego okresu eksploatacji intensywność uszkodzeń utrzymuje się na stałym poziomie. Jest to okres przewidywanego użytkowania sprzętu, podczas którego występujące uszkodzenia są najczęściej spowodowane przez użytkownika (np. przekroczenie dopuszczalnych warunków pracy, uszkodzenia mechaniczne itp.). Długość okresu określana jest parametrem MTBF, czyli średnim czasem między awariami. Po upływie czasu równego MTBF, intensywność uszkodzeń gwałtownie rośnie. Jest to trzeci okres eksploatacji, podczas którego występujące uszkodzenia wynikają np. ze zużycia zmęczeniowego złączy.

3 Wytrzymałość mechaniczna złączy lutowanych, fazy międzymetaliczne

3.1 Wymagania stawiane złączom lutowanym

Warunkiem uzyskania właściwego połączenia mechanicznego między lutowanymi powierzchniami jest:

- zwilżenie lutowanych powierzchni ciekłym lutem,
- dyfuzja atomów ciekłego lutowania w łączone powierzchnie,
- rozpuszczanie metali podłoża w ciekłym lutowaniu,
- formowanie się faz międzymetalicznych na granicy ciała stałe - ciecz (metal lutowany - lut),
- dalsza dyfuzja w ukształtowanym złączu po zastygnięciu ciekłego lutowania.

Występowanie każdego z tych zjawisk jest zależne od składu chemicznego stopu lutowniczego i metali lutowanych wraz z powłokami metalicznymi, czasu trwania reakcji, temperatury ciekłego lutowania oraz materiału topnika [27]. W normalnych i ekstremalnych

warunkach eksploatacyjnych złącza lutowane poddawane są czynnikom narażeniowym, które ujawniają wytrzymałość zmęczeniową złączy. Oczywiście wytrzymałość tych złączy powinna być na tyle duża, aby średni czas do wystąpienia awarii przekraczał założony czas eksploatacji urządzenia. Ocena wpływu wyeliminowania ołowiu ze składu stopów lutowniczych na ich wytrzymałość zmęczeniową jest niejednoznaczna. Niektóre jednostki badawcze wskazują jednoznacznie na porównywalną [2] lub mniejszą wytrzymałość zmęczeniową złączy wykonanych stopami bezołowiowymi w porównaniu ze złączami wykonanymi stopami zawierającymi ołów [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]. Inne jednostki badawcze wykazują, że jedynie w warunkach ekstremalnych (np. bardzo szybkie zmiany temperatury) złącza wykonane lutami bezołowiowymi charakteryzują się mniejszą wytrzymałością zmęczeniową w porównaniu ze złączami wykonanymi przy wykorzystaniu stopów zawierających ołów. [5], [35], [36], [37], [38]. Mniejsza wytrzymałość zmęczeniowa bezołowiowych połączeń lutowanych może mieć związek z formującymi się fazami międzymetalicznymi i może wynikać z obecności:

- ciągłych kruchych warstw faz międzymetalicznych formujących się na granicy między stopem lutowniczym, a powłokami zabezpieczającymi,
- faz międzymetalicznych cyny i metali szlachetnych formujących się w objętości lutu,
- luk Kirkendalla powstających wzdłuż warstw faz międzymetalicznych,
- zjawiska złuszczenia warstw faz międzymetalicznych.

Wyżej wymienione czynniki zmniejszające wytrzymałość mechaniczną bezołowiowych złączy lutowanych są następstwem procesów dyfuzyjnych zachodzących w obrębie złącza, a ich obecność ma ścisły związek z kinetyką wzrostu warstw faz międzymetalicznych.

O wadze problemu niezawodności w warunkach nowych technologii może świadczyć fakt, że z zakresu obowiązywania przepisów dyrektywy RoHS został wyłączony sprzęt medyczny oraz sprzęt wojskowy, czyli sprzęt klasy 3 obejmującej produkty, dla których krytyczna jest stała niezawodność lub działanie na żądanie (według normy IPC-A-610) [24].

3.2 Przyczyny pękania złączy lutowanych w warunkach narażeń

Złącza lutowane mogą być poddawane naprężeniom własnym, wywołanym procesami technologicznymi (procesy wytwarzania powłok, proces lutowania) jak również naprężeniom wywołanym czynnikami zewnętrznymi (stała wysoka temperatura, cyklicznie zmienna temperatura, wibracje, udary mechaniczne, ściskanie, rozciąganie, skręcanie, zginanie itp.).

Skutkiem działania zbyt dużych naprężeń są pęknięcia złączy. Ponadto złącza lutowane podczas eksploatacji mogą być poddawane innym narażeniom środowiskowym spowodowanym np. poziomem wilgotności, poziomem ciśnienia, zasoleniem (korozja), składem atmosfery otaczającej obiekt (korozja).

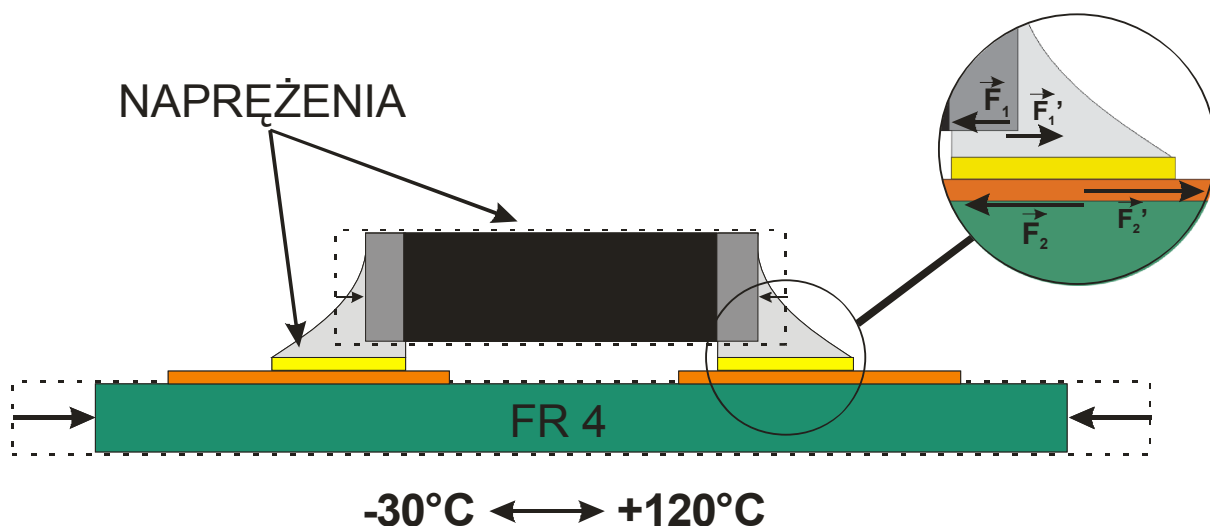
Struktura krystaliczna złącza lutowanego, w którym doszło do kumulacji naprężeń własnych ulega zmianom z upływem czasu na skutek relaksacji naprężeń. Powolny proces relaksacji może odbywać się przez pękanie struktury w obszarach o zmniejszonej wytrzymałości mechanicznej lub wzrost kryształów nitkowych (wiskersów) w obszarach występowania dyslokacji sieci krystalicznej. Skala występowania pęknięć oraz zjawiska wzrostu wiskersów zależy od temperatury, wartości skumulowanych naprężeń oraz zagęszczenia defektów struktury złącza.

Naprężenia wywołane działaniem sił stałych w czasie (stały zwrot, kierunek i wartość) mają charakter statyczny. Długotrwałe poddawanie złączy lutowanych naprężeniom statycznym mniejszym od granicy plastyczności ich materiałów prowadzi do powolnej zmiany kształtu złączy wskutek pełzania. Naprężenia wywołane działaniem zmieniających się w czasie sił (zmieniający się zwrot, kierunek i wartość) mają charakter dynamiczny. Długotrwałe poddawanie złączy lutowanych naprężeniom dynamicznym prowadzi do pęknięcia złączy na skutek przekroczenia wytrzymałości zmęczeniowej materiałów [39].

W warunkach narażeń złącza lutowane poddawane są naprężeniom wywołanym:

- cyklicznie zmieniającą się temperaturą,
- odkształceniami podłoża na skutek wibracji i innych obciążeń mechanicznych.

Złącze lutowane stanowi łącznik między kontaktem podzespołu elektronicznego a polem kontaktowym mozaiki przewodzącej podłoża. Zmiana temperatury przyczynia się do występowania naprężeń w obszarze złącza lutowanego jeżeli występuje niedopasowanie współczynników rozszerzalności liniowej łączonych materiałów. Mechanizm powstawania naprężeń spowodowanych zmianą temperatury przedstawiono schematycznie na rysunku 3.1. Długoterminowe cykliczne działanie sił ścinających prowadzi do pęknięcia zmęczeniowego złącza.



Rysunek 3.1: Kumulacja sił ścinających w obszarze złącza wynikających z odkształceń podłoża i elementu wskutek cyklicznych zmian temperatury

Wartości współczynników rozszerzalności liniowej wybranych materiałów stosowanych w montażu podzespołów elektronicznych zamieszczono w tabeli 3.1 [5], [24]. Dopuszczalne niedopasowanie temperaturowych współczynników rozszerzalności liniowej łączonych materiałów nie powinno być większe niż 29 ppm/K [40].

Material	Współczynnik rozszerzalności liniowej [ppm / K]	Material	Współczynnik rozszerzalności liniowej [ppm / K]
Stop Sn37Pb	25	Żywica epoksydowa wzmocniona włóknami szklanymi	(X,Y) 14-20 (Z) 66
Stop Sn3,6Ag	22	Żywica epoksydowa wzmocniona włóknami aramidowymi	X,Y 6-8 (Z) 83
Stop Sn1Cu	16,6	Poliamid wzmocniony włóknami szklanymi	(X,Y) 12-16 (Z) 40-60
Stop Sn2Cu0,9Bi	18,7	Poliamid wzmocniony włóknami aramidowymi	(X,Y) 5-8 (Z) 83
Miedź CDA 101	17,6	Ceramika Du Pont 951	5,8
Złoto	14	Ceramika Ferro A6S	7
Zrebro	19	Żywica epoksydowa (70 % SiO ₂) obudów plastikowych	20-23
Cyna	22	Aluminium (nośnik stuktur ceramicznych)	5,9-7,4

Tabela 3.1: Zestawienie współczynników rozszerzalności liniowej materiałów powszechnie stosowanych w montażu podzespołów elektronicznych

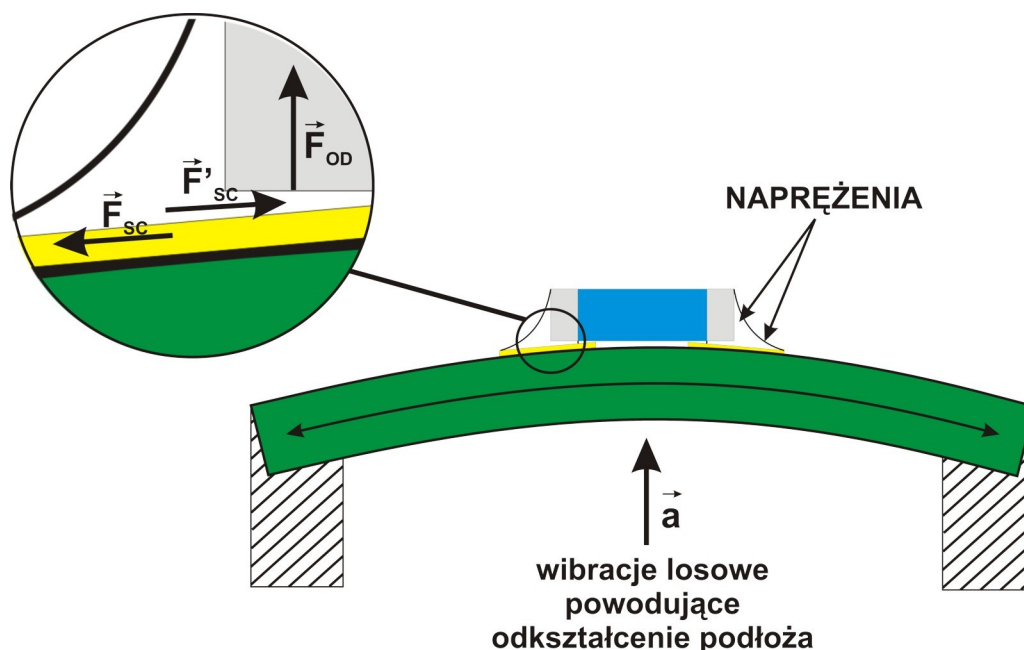
W warunkach eksploatacyjnych urządzenia elektryczne i elektroniczne narażone są na

wibracje, które mogą wynikać ze specyfiki pracy tych urządzeń lub ze współpracy z innymi systemami oraz udary mechaniczne wywołane zdarzeniami losowymi np. upadkami. Obciążenia mechaniczne mogą być przenoszone na poszczególne podzespoły urządzenia a następnie na podłoża, na których zamontowane są elementy elektroniczne. Podłoża poddane wibracjom lub udom mechanicznym mogą ulegać odkształceniom sprężystym. Zakres odkształceń zależy od modułu sprężystości materiału podłoża, sposobu przytwierdzenia podłoża do obudowy urządzenia, osi, amplitudy oraz częstotliwości wibracji lub energii udom mechanicznych. Na złącza lutowane poddawane obciążeniom mechanicznym mogą działać zarówno siły ścinające jak i siły odrywające przylutowany element. Prawdopodobieństwo pęknięcia złącza wskutek wibracji lub udom mechanicznych zależy od masy i profilu przylutowanego elementu, rodzaju i kształtu wyprowadzeń elementu, właściwości mechanicznych podłoża oraz proporcji objętość złącza : masa i wysokość elementu.

Złącza lutowane elementów montowanych powierzchniowo SMD (ang. Surface Mount Devices) poddawane wibracjom pękają wskutek:

- działania sił odrywających element, jeżeli element ma dużą masę i krańcowe punkty lutownicze są położone blisko siebie (np. induktry lub kondensatory elektrolityczne). W większości przypadków obsadzone płytki obwodów drukowanych pracują w pozycji pionowej, by zapewnić skuteczne chłodzenie grawitacyjne elementów na płytkach. Taka pozycja pracy płytek sprzyja uszkodzeniom mechanicznym (odrywanie, pełzanie),
- działania połączonych sił ścinających i odrywających, jeżeli element jest sztywny, jego punkty lutownicze są położone w stosunkowo dużej odległości biorąc pod uwagę proporcję wymiarów (np. kondensatory ceramiczne SMD) a podłoże jest wykonane z materiału sprężystego.

Działanie sił ścinających i odrywających na złącze lutowane w przypadku znacznych odkształceń płytki obwodu drukowanego pokazano na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2: Kumulacja sił ścinających F_{SC} , F'_{SC} i odrywających F_{OD} w obszarze złącza wynikających z odkształceń podłoża wskutek wibracji

Odrywanie od podłoża poddawanego wibracjom elementów o dużej masie występuje niezależnie od właściwości mechanicznych podłoża, ponieważ dominujące znaczenie ma siła odrywająca, wynikająca z masy elementu i przyspieszenia jakiemu ten element poddano. W innych przypadkach znaczenie mogą mieć właściwości mechaniczne (elastyczność) podłoża. W celu weryfikacji wpływu sił ścinających oraz odrywających na degradację złączy lutowanych przeprowadzono testy wibracyjne złączy lutowanych na płytках obwodów drukowanych. Płytki obwodów drukowanych wykonane z laminatów żywicy epoksydowej wzmocnionej włóknami szklanymi (FR4) z przylutowanymi elementami SMD poddano wibracjom o kierunku przyspieszenia jak na rysunku 3.2.

Test wibracyjny prowadzono przez 120 godzin, przy czym podłoża poddawano wibracjom losowym o częstotliwościach z zakresu 50-500 Hz i gęstości widmowej mocy drgań równej $0,013 \text{ g}^2/\text{Hz}$. Stwierdzono, że złącza lutowane kondensatorów elektrolitycznych SMD o dużej masie na polach lutowniczych pokrytych powłoką ENIG pękały średnio po 4 godzinach testu, podczas gdy złącza lutowane kondensatorów ceramicznych SMD 1206 oraz induktorów SMD o małej masie na tych samych polach uległy degradacji średnio po 80 godzinach testów. Wyniki te mogą wskazywać, że dla warunków eksperymentu, w zależności od masy elementu, dominujące znaczenie dla degradacji złącza mogą mieć siły odrywające (F_{OD} na rysunku 3.2) lub siły ścinające (F_{SC} , F'_{SC} na rysunku 3.2).

3.3 Fazy międzymetaliczne

3.3.1 Kinetyka wzrostu faz międzymetalicznych

Fazy międzymetaliczne wykazują właściwości metaliczne ze względu na całkowity lub częściowy udział wiązania metalicznego między ich atomami.

Skład chemiczny i budowa fazy międzymetalicznej zależy między innymi od składu chemicznego i budowy krystalicznej łączonych materiałów oraz stanu ich powierzchni [41]. W przypadku lutowania skład fazy determinuje materiał stopu lutowniczego i powłoki pola lutowniczego. Stosowane w montażu elektronicznym bezołowiowe stopy lutownicze (rozdział 2.2.1) jako materiał podstawowy zawierają cynę i ten pierwiastek uznaje się za decydujący o fazach międzymetalicznych, zależnych dodatkowo od materiału pól lutowniczych. W tabeli 3.2 zebrano przykłady faz międzymetalicznych, które mogą się formować podczas procesu lutowania i po procesie lutowania na najczęściej stosowanych powłokach pól lutowniczych [5], [6].

Powłoka pola lutowniczego	System	Termodynamicznie stabilne fazy międzymetaliczne
Cyna immersyjna	Sn-Cu	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Cu_4Sn , Cu_3Sn_8
HASL (Sn AgCu)	Sn-Cu	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Cu_4Sn , Cu_3Sn_8
Srebro immersyjne	Sn-Ag	Ag_3Sn
ENIG (Au/Ni(P))	Sn-Au	$AuSn_4$, $AuSn$, $AuSn_2$
	Sn-Ni	Ni_3Sn , Ni_3Sn_2 , Ni_3Sn_4

Tabela 3.2: Termodynamicznie stabilne fazy formujące się na najczęściej używanych powłokach pól lutowniczych (przy stosowaniu stopów lutowniczych bogatych w cynę) [5], [6]

Fazy międzymetaliczne formują się podczas krzepnięcia płynnego lutu podczas procesu lutowania lub wskutek dyfuzji w fazie stałej. W procesie formowania warstw faz międzymetalicznych kluczową rolę odgrywa proces dyfuzji reakcyjnej, której przebieg można podzielić na dwa etapy [6]:

- powstanie nowej fazy między łączonymi metalami na skutek zachodzącej reakcji chemicznej,
- rozrost powstałej fazy wskutek dyfuzji.

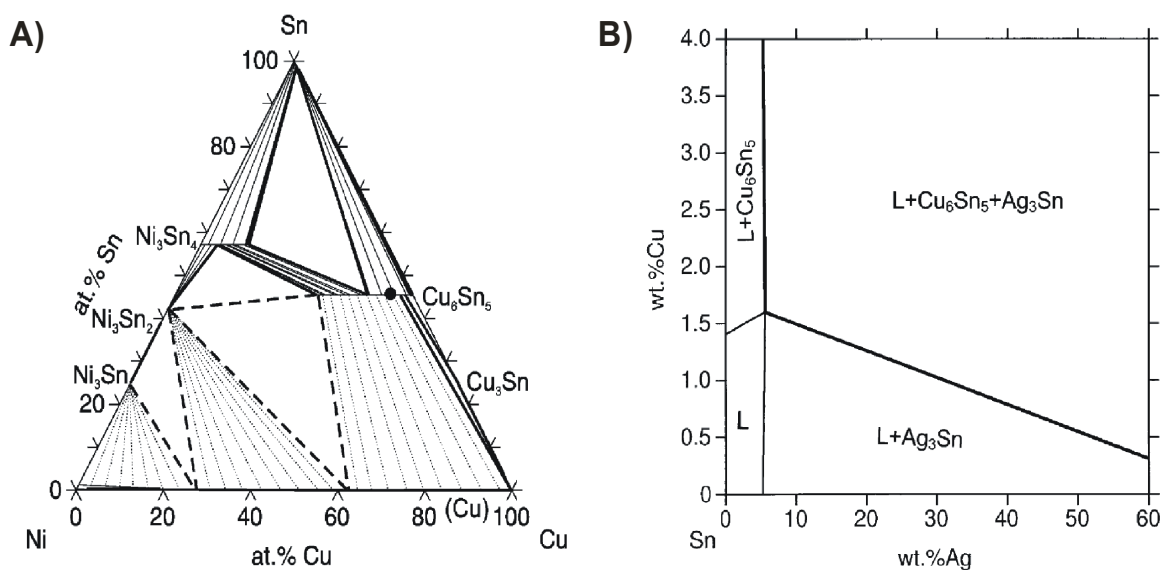
Fazy międzymetaliczne formują się w wyniku:

- dyfuzji atomów pierwiastków wchodzących w skład lutu w głąb stopów bazowych lub metali lutowanych,

- dyfuzji atomów pierwiastków wchodzących w skład stopów bazowych lub metali lutowanych w głąb lutu,

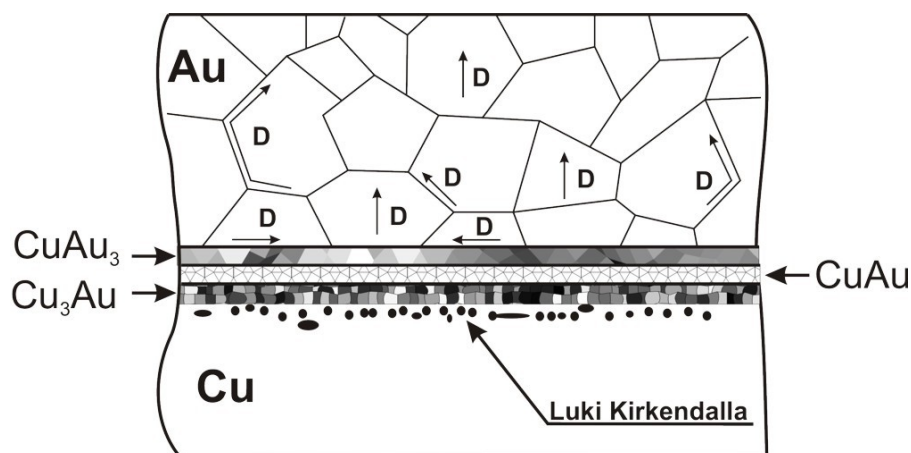
zgodnie z wykresem równowagi między metalem rozpuszczanym i rozpuszczającym [6].

Przykładowe wykresy równowagi fazowej układów trójskładnikowych, opracowane na podstawie badań doświadczalnych, przedstawiono na rysunku 3.3. Na podstawie analizy wykresów, znając stężenie wagowe składników można określić skład i kolejność formowania się faz międzymetalicznych podczas procesu lutowania [31].



Rysunek 3.3: Wykresy równowagi fazowej układów trójskładnikowych: A) Sn-Cu-Ni w temperaturze 235°C - fazy Cu_6Sn_5 i Ni_3Sn_4 , B) Sn-Cu-Ag w temperaturze 260°C - fazy Cu_6Sn_5 i Ag_3Sn [31]

Rodzaje dyfuzji na przykładzie dyfuzji atomów miedzi do warstwy złota oraz związane z nią ubytki materiału zaprezentowano schematycznie na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4: Dyfuzja atomów miedzi do warstwy złota. Formowanie faz międzymetalicznych oraz luk Kirkendalla

W metalach proces dyfuzji może zachodzić wzdłuż granic ziaren, wzdłuż dyslokacji, w kryształach oraz równoległe do powierzchni metalu. Obecność procesów dyfuzji atomów między łączonymi metalami jest warunkiem powstania wytrzymałego mechanicznie złącza. Jednak kiedy szybkość dyfuzji obydwu składników nie jest jednakowa, nadmierna dyfuzja atomów może skutkować występowaniem luk w sieci krystalicznej. W konsekwencji dalsza dyfuzja zamiast zwiększać wytrzymałość mechaniczną złącza może prowadzić do destrukcji jego struktury.

Na grubość warstwy fazy międzymetalicznej, która formuje się podczas procesu lutowania najistotniejszy wpływ mają parametry materiałowe, takie jak stałe dyfuzji pierwiastka do fazy oraz gradient koncentracji pierwiastka w kierunku prostopadłym do powierzchni międzyfazowej, a także parametry procesu lutowania jak temperatura lutowania, czas przebywania powyżej temperatury topnienia lutu oraz gradient schładzania złączy po procesie lutowania.

Wzrost grubości warstwy fazy międzymetalicznej Y [m] po procesie lutowania wynika z procesów dyfuzji. Grubość warstwy fazy międzymetalicznej w funkcji czasu opisuje równanie:

$$Y = Y_0 + \sqrt{D \cdot t} , \quad (3.1)$$

w którym:

- Y_0 - grubość warstwy fazy międzymetalicznej dla $t=t_0$ [m] ,
- D – współczynnik dyfuzji zależny od temperatury $[\frac{m^2}{s}]$.

Zależność współczynnika dyfuzji od temperatury wyrażona jest równaniem Arrheniusa:

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT} , \quad (3.2)$$

w którym:

- D_0 - stała dyfuzji $[\frac{m^2}{s}]$,
- Q – energia aktywacji dla dyfuzji $[\frac{J}{mol}]$,
- R – stała gazowa równa 8,314 $[\frac{J}{mol \cdot K}]$,

- T – temperatura [m] .

Grubość formującej się fazy międzymetalicznej zależy liniowo od pierwiastka kwadratowego z czasu. Natomiast współczynnik dyfuzji fazy międzymetalicznej zależy od temperatury oraz stałej dyfuzji i energii aktywacji procesu dyfuzji.

Energię aktywacji oraz stałą dyfuzji fazy międzymetalicznej można w przybliżeniu oszacować na podstawie badań eksperymentalnych, polegających na pomiarze przyrostu grubości warstwy fazy międzymetalicznej w wyniku przeprowadzania procesów wygrzewania w różnych temperaturach. Dokładność metody ogranicza dokładność pomiaru grubości warstw faz międzymetalicznych.

Badania eksperymentalne wykazują, iż zarówno wartość stałej dyfuzji jak i energii aktywacji wzrostu fazy międzymetalicznej przybierają różne wartości w zależności od składu użytego stopu lutowniczego, powłoki pola lutowniczego lub materiału mozaiki przewodzącej [42]. Jako przykład w tabeli 3.3 przedstawiono wartości energii aktywacji wzrostu fazy Cu_3Sn wyliczone na podstawie przeprowadzonych eksperymentów, obejmujących inspekcję mikroskopową złączy lutowanych wykonanych przy wykorzystaniu różnych stopów.

Jak przedstawiono w tabeli 3.3 wartość energii aktywacji wzrostu fazy Cu_3Sn może zawierać się w przedziale od kilkudziesięciu do ponad 100 kJ/mol w zależności od użytego stopu lutowniczego. W rzeczywistości wartość energii aktywacji wzrostu fazy międzymetalicznej zależy przede wszystkim od wielkości ziaren faz, w których zachodzą procesy dyfuzji. Sposób nakładania powłok metalicznych na pola lutownicze lub wyprowadzenia elementów istotnie wpływa na wielkość ich ziaren [42].

Stop lutowniczy	Faza międzymetaliczna	Energia aktywacji [kJ/mol]
100Sn	Cu_3Sn	59,2
Sn3,9Ag0,6Cu	Cu_3Sn	50
Sn0,5Ag4Cu	Cu_3Sn	38
Sn3,5Ag	Cu_3Sn	42
Sn0,7Cu	Cu_3Sn	104,2

Tabela 3.3: Energia aktywacji wzrostu fazy wyliczona dla Cu_3Sn na podstawie obserwacji bezołowiowych złączy lutowanych wykonanych na warstwie miedzi [42].

Wzrost warstw faz międzymetalicznych jest procesem długotrwałym. W warunkach przechowywania w temperaturze pokojowej, bez dodatkowego obciążenia zmęczeniowego w postaci cyklicznie zmieniającej się temperatury, zmiana grubości warstwy fazy

międzymetalicznej o kilka μm może trwać nawet kilkanaście lat.

W celu przyspieszenia wzrostu warstw faz międzymetalicznych złącza lutowane poddaje się procesom wygrzewania, trwającym zwykle od kilkuset do kilku tysięcy godzin w temperaturze z zakresu 100-150°C, dostarczając im w ten sposób energii zewnętrznej [31], [43], [44], [45], [46]. Wymagany czas procesu starzenia prowadzonego w określonej temperaturze można wyliczyć znając wartość energii aktywacji wzrostu oraz stałej dyfuzji faz międzymetalicznej. W tabeli 3.4 podano wyliczone przez autora przykładowe parametry procesów starzenia złączy lutowanych wykonanych na warstwie miedzi przy wykorzystaniu stopu Sn_{3,9}Ag_{0,6}Cu.

Przyspieszone starzenie w stałej temperaturze		Przechowywanie w temperaturze 25 °C
Temperatura [°C]	Czas [h]	Czas
50	300	2 miesiące
50	600	4 miesiące
50	900	6 miesięcy
100	300	2 lata
100	600	3 lata
100	900	4 lata
150	300	13 lat
150	600	26 lat
150	900	39 lat

Tabela 3.4: Czas jednakowego przyrostu warstwy fazy międzymetalicznej w warunkach przyspieszonego starzenia oraz normalnego użytkowania lub przechowywania w warunkach normalnych

Jako kryterium oceny efektu procesu starzenia przyjęto grubość warstwy fazy międzymetalicznej Cu₃Sn. Obliczeń dokonano w oparciu o rezultaty długotrwałych eksperymentów przytoczonych w literaturze [42]. Przeprowadzone analizy wykazały, iż przechowywanie złączy lutowanych w warunkach stałej temperatury równej 150°C przez 300 godzin może odpowiadać przechowywaniu w temperaturze pokojowej przez okres 13 lat.

Przeciętna grubość faz międzymetalicznych obserwowanych w złączach lutowanych wykonanych na płytkach obwodów drukowanych zawiera się w przedziale od kilkuset nm do kilkunastu μm [42], [45].

3.3.2 Kruche warstwy faz międzymetalicznych

Fazom międzymetalicznym przypisuje się wzory podobne do wzorów związków chemicznych. Jednak wzajemne stosunki ilościowe atomów składników rzadko odpowiadają wartościowościom chemicznym pierwiastków, jakie wykazują w związkach chemicznych. Struktura krystaliczna faz międzymetalicznych różni się od struktury każdego z tworzących ją składników. Atomy każdego ze składników wykazują uporządkowane rozmieszczenie w sieci krystalicznej fazy międzymetalicznej, a w oddziaływaniach między nimi występuje przewaga wiązania metalicznego [41].

Fazy międzymetaliczne odgrywają istotną rolę w formowaniu połączenia mechanicznego między lutem a metalem bazowym. Jak wcześniej wspomniano, warunkiem koniecznym połączenia lutu z metalem bazowym jest wzajemna dyfuzja atomów łączonych faz, czego skutkiem jest formowanie się faz międzymetalicznych. Jednakże w przypadku faz międzymetalicznych między atomami oprócz wspomnianych wiązań metalicznych występują również wiązania kowalencyjne, co sprawia, że fazy międzymetaliczne są często są bardziej kruche niż czyste metale [5].

Stopy lutownicze, podobnie jak metale powłok ochronnych oraz metale mozaiki przewodzącej, wykazują cechy materiałów sprężystych o zauważalnych zakresach plastyczności. Natomiast fazy międzymetaliczne wykazują cechy kruchych materiałów o małym zakresie sprężystości, a ich obecność w złączu lutowanym może istotnie zmniejszać jego wytrzymałość zmęczeniową, jeżeli faza międzymetaliczna występuje w formie warstwy na granicy metalu lutowanego i lutu. Jeżeli jednak fazy międzymetaliczne w formie ziaren są rozmieszczone mniej lub bardziej równomiernie w objętości złącza, to umacniają złącze i zwiększają jego wytrzymałość mechaniczną.

Oslabienie mechaniczne złącza lutowanego wynikające z kruchości faz międzymetalicznych jest szczególnie zauważalne w przypadku, gdy:

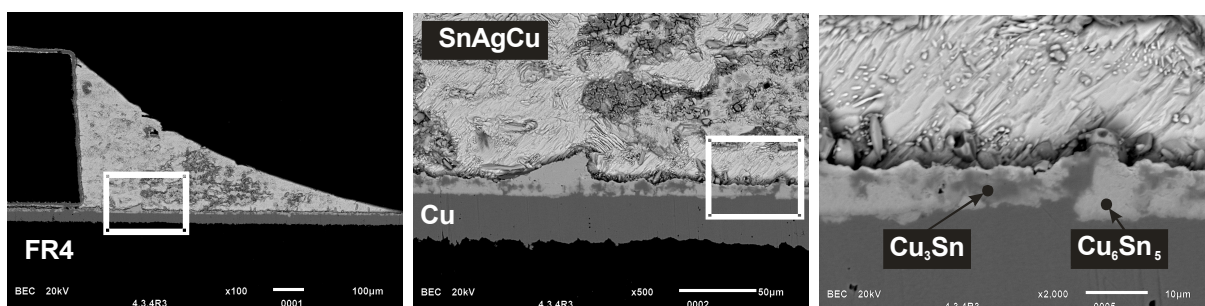
- faza międzymetaliczna ma postać grubej, ciągłej, jednorodnej warstwy,
- na granicy lutu i metalu bazowego (powłoki zabezpieczającej lub mozaiki przewodzącej) formuje się kilka warstw różnych faz międzymetalicznych.

Grubość warstw, kształt i różnorodność faz międzymetalicznych formujących się podczas procesu lutowania zależy głównie od składu łączonych faz, czasu przebywania złącza lutowanego powyżej temperatury liquidus oraz prędkości schładzania złącza bezpośrednio po procesie lutowania. Im szybciej przebiega proces chłodzenia, tym łatwiej tworzy się struktura

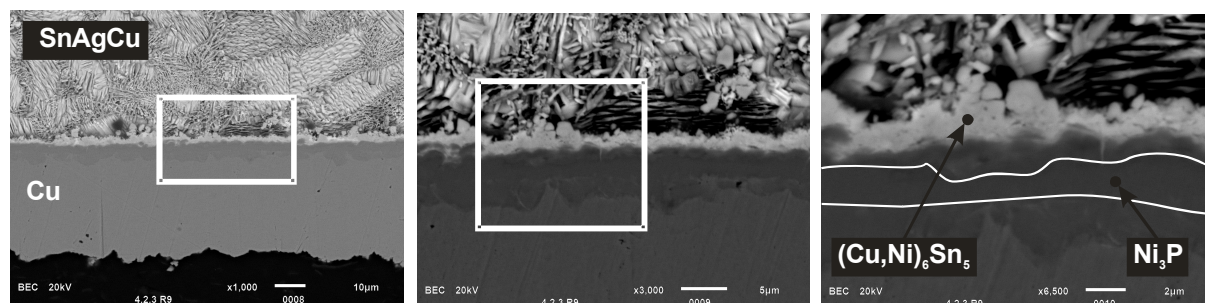
drobnokrystaliczna. Mikrostruktura złącza istotnie wpływa na jego granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie [5], [6], [41].

Dalsze zmiany grubości i kształtu faz międzymetalicznych, uformowanych podczas procesu lutowania, są następstwem procesów dyfuzji zachodzących w ciele stałym i zależą od współczynników dyfuzji, wielkości ziaren oraz struktury sąsiadujących warstw.

Przykład nieciągłych warstw Cu_3Sn oraz Cu_6Sn_5 zaprezentowano na rysunku 3.5. Przykład ciągłych warstw Ni_3P oraz $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ pokazano na rysunku 3.6. Łączna grubość warstw zaobserwowanych w obu przypadkach nie przekracza $10\ \mu\text{m}$.



Rysunek 3.5: Nieciągłe warstwy faz międzymetalicznych formujące się na granicy stopu lutowniczego SnAgCu oraz warstwy miedzi pokrytej powłoką stopu lutowniczego Sn99,6Ag0,3NiGe nakładanego metodą HASL (źródło własne)



Rysunek 3.6: Ciągłe warstwy faz międzymetalicznych formujące się na granicy stopu lutowniczego SnAgCu oraz warstwy miedzi pokrytej powłoką Au/Ni(P) ENIG (źródło własne)

W celu ograniczenia niepożądanego dyfuzji między sąsiednimi warstwami metali stosuje się warstwy stanowiące barierę dyfuzyjną. Funkcję bariery dyfuzyjnej pełni np. warstwa niklu, zabezpieczająca warstwę złota powłok ENIG (Au/Ni(P)) przed dyfuzją do niej miedzi. Obecność miedzi, łatwo ulegającej utlenieniu na powierzchni pola lutowniczego, grozi utratą lutowności. Warstwa niklu zabezpiecza również przed nadmierną dyfuzją między miedzią i cyną [5].

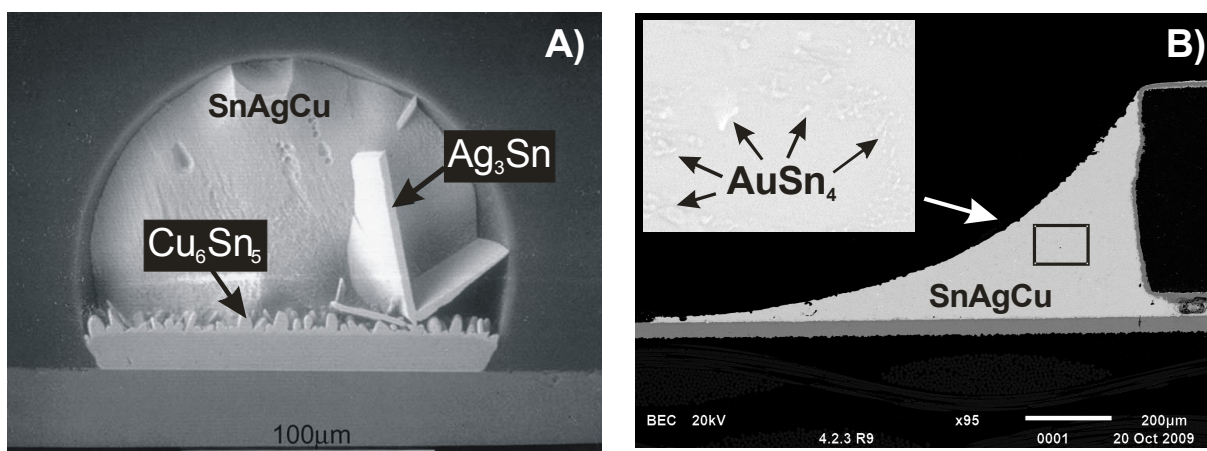
Prowadzone prace badawcze wykazały, iż grubość ciągłych warstw faz

międzymetalicznych formujących podczas procesu lutowania stopów SnAgCu na warstwie miedzi nie zależy od objętości lutu. W konsekwencji, w złączach lutowanych np. dużych elementach do montażu powierzchniowego (ang. Surface Mount Technology - SMD) oraz w złączach flip-chip można spodziewać się warstw faz międzymetalicznych o tej samej grubości, przy czym udział kruchej warstwy fazy międzymetalicznej w wysokości złącza jest zdecydowanie większy w przypadku złączy flip-chip [6]. Bowiem zazwyczaj wymiary złączy flip-chip są dużo mniejsze niż wymiary złączy elementów SMD (rysunek 3.7).

Wraz z dalszą miniaturyzacją elementów oraz ich wyprowadzeń, procentowy udział kruchych warstw faz międzymetalicznych w całkowitej objętości złącza lutowanego będzie zwiększał się. W niedalekiej przyszłości może to stanowić istotne ograniczenie stosowania dotychczasowej technologii lutowania przy wykorzystaniu stopów bezołowiowych w montażu elektronicznym.

3.3.3 *Fazy międzymetaliczne cyny oraz metali szlachetnych formujące się w objętości lutu*

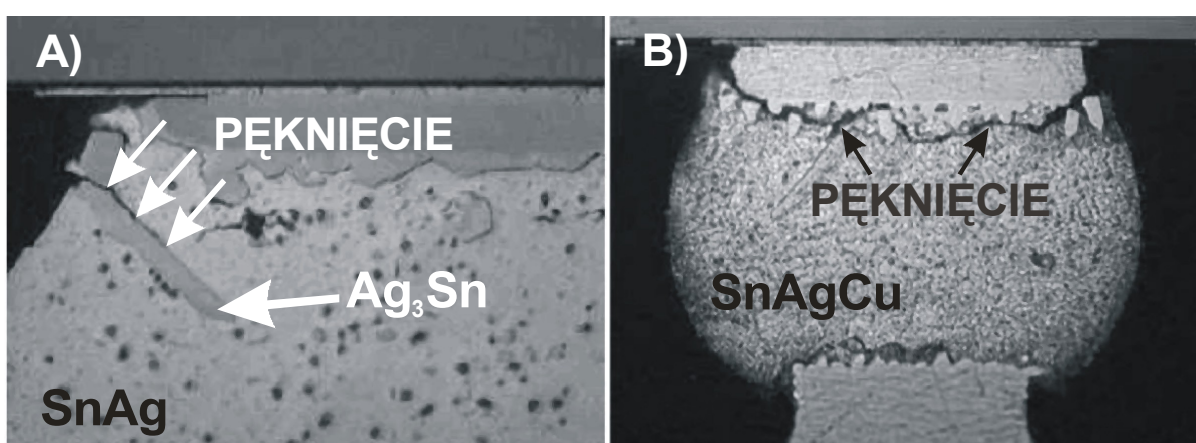
Lokalizacja faz międzymetalicznych w głównej mierze zależy od metali biorących udział w ich formowaniu. Jeżeli w formowaniu faz biorą udział metale nie będące metalami szlachetnymi, np. cyna, miedź, nikiel, to fazy np. Cu_3Sn , $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$, Cu_6Sn_5 , Ni_3Sn_4 formują się wzdłuż granicy między lutem a polem lutowniczym. Jeżeli w formowaniu faz bierze udział cyna oraz złoto lub srebro, to fazy (np. Ag_3Sn , AuSn_4) mogą formować się w dowolnej lokalizacji w objętości lutu przyjmując postać kolumn, igieł lub płaskich tafli [31]. Przykład występowania faz międzymetalicznych przybierających postać tafli oraz igieł wewnątrz złącza pokazano na rysunku 3.7.



Rysunek 3.7: Fazy międzymetaliczne formujące się w objętości lutu: A) Ag_3Sn (T.Y. Lee, UCLA), B) AuSn_4 (źródło własne)

Obecność drobnych kryształów faz międzymetalicznych, rozproszonych w objętości lutu może wzmacniać złącze lutowane. Jednak duże wydzielenia faz mogą inicjować pęknięcia [6]. W praktyce pęknięcia tego typu występują stosunkowo rzadko, gdyż pola naprężeń są największe w pobliżu powierzchni granicznych, a nie w objętości złącza.

Szczególnie niepożądanym zjawiskiem jest formowanie się faz w postaci tafli w narożnikach złączy oraz w obszarach granicznych, gdzie kumulują się największe naprężenia. W wyniku kumulacji naprężeń często dochodzi w tych obszarach do zapoczątkowania pęknięć i ich dalszej propagacji wzdłuż granicy fazy międzymetalicznej i lutu. Przykładowe pęknięcia złączy flip-chip wzdłuż warstw faz międzymetalicznych przedstawiono na rysunku 3.8.



Rysunek 3.8: Pęknięcia złączy flip-chip wykonanych na powłoce ENIG zaobserwowane po poddaniu złączy cyklom temperaturowym (C. Zhang, Motorola)

Występowanie kruchych faz międzymetalicznych Ag_3Sn oraz $AuSn_4$ jest uzależnione od zawartości rozpuszczonego metalu w stopie. Dla przykładu, faza $AuSn_4$ formuje się jeżeli zawartość rozpuszczonego złota w stopie bogatym w cynę przekracza 3-5% zawartości wagowej [5], [47].

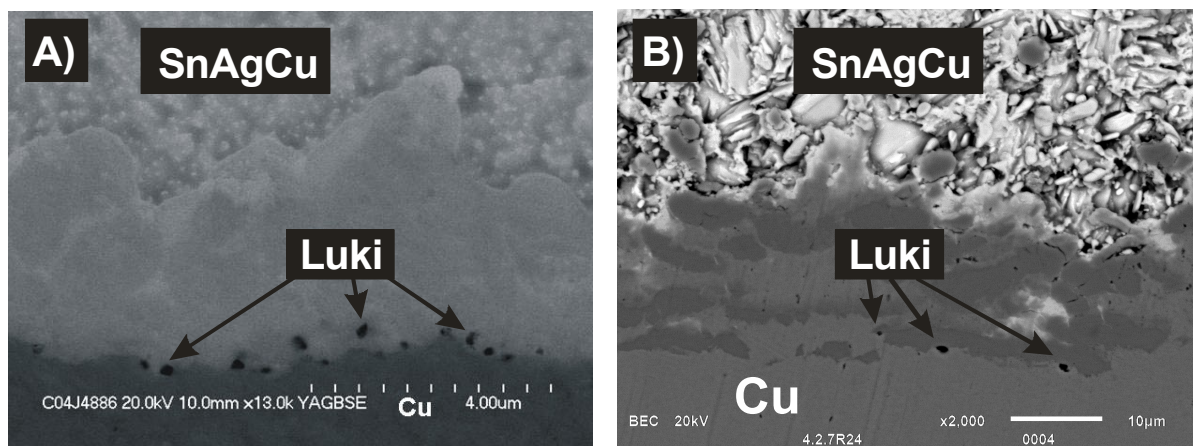
3.3.4 Luki Kirkendalla w warstwach faz międzymetalicznych

Zmiany grubości oraz kształtu warstw faz międzymetalicznych nie są jedynymi konsekwencjami procesów dyfuzyjnych, zachodzących w obszarze złącza lutowanego. Poddając złącza lutowane procesom przyspieszonego starzenia w niektórych warstwach faz międzymetalicznych oraz w ich bezpośrednim sąsiedztwie występuje tzw. zjawisko Kirkendalla (rysunek 3.4 oraz 3.9), polegające na formowaniu się luk [42], [31]. Zjawisko wywoływane jest przez procesy dyfuzji przyspieszanej w warunkach wysokiej temperatury i długiego czasu wygrzewania. W warunkach normalnego użytkowania złączy lutowanych

przebieg zjawiska jest znacznie wolniejszy. Niemniej jednak jego występowanie nie powinno być bagatelizowane. Luki powstają przez koalescencję wakansów będących skutkiem niebilansowanej dyfuzji wzajemnej metali między sąsiadującymi fazami [42]. Warunkiem koniecznym występowania luk Kirkendalla jest różnica współczynników dyfuzji sąsiadujących materiałów.

Zjawisko Kirkendalla występuje często w złączach lutowanych stopami SnAgCu na polach lutowniczych pokrytych powłokami ENIG. Między uformowanymi podczas procesu lutowania krystalicznymi warstwami roztworu stałego Ni_3P oraz fazy międzymetalicznej $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ formuje się cienka warstwa krystaliczna, zawierająca nikiel, cynę oraz fosfor (NiSnP). Powstała warstwa jest produktem reakcji międzyfazowych między fazami $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$, Ni_3P oraz cyną. Grubość powstałej warstwy NiSnP wynosi około 200 nm. Warstwę cechuje obecność luk Kirkendalla. Liczba luk rośnie wraz z kolejnymi procesami rozplwu i wyżarzania, co jest spowodowane dyfuzją atomów cyny z warstwy NiSnP do warstwy Ni_3P oraz dyfuzją atomów niklu z warstwy $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ do warstwy NiSnP [31].

Przykłady występowania zjawiska Kirkendalla w złączach lutowanych stopem SnAgCu na powłoce OSP [48] oraz ENIG pokazano na rysunku 3.9. Średnica zaobserwowanych luk nie przekracza 2 μm .

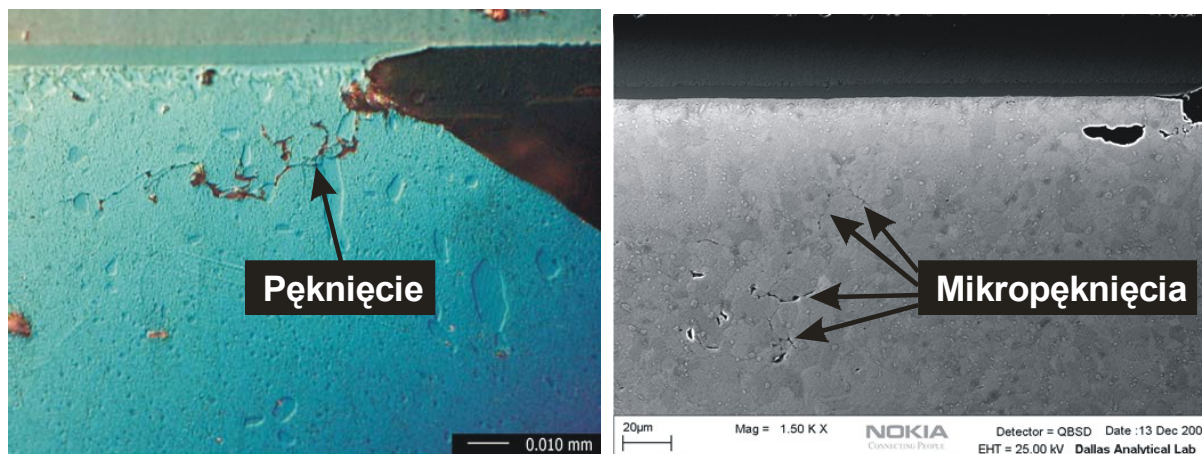


Rysunek 3.9: Luki Kirkendalla formujące się wzdłuż warstw faz międzymetalicznych:

- A) złącze na powłoce OSP po 2000 cyklach temperaturowych $-20 \Leftrightarrow 125^\circ\text{C}$ (Z. Mei, Cisco),
B) złącze na powłoce ENIG po 600 wygrzewania w temperaturze 150°C (źródło własne)

Zjawisko Kirkendalla jest zjawiskiem niepożądanym, ponieważ obecność defektów struktury zwiększa podatność złącza na pękanie pod wpływem naprężeń, których źródłem mogą być czynniki narażeniowe [42], [31]. Wytrzymałość zmęczeniowa złączy lutowanych zmniejsza się wraz ze wzrostem zagęszczenia oraz rozmiarów luk Kirkendalla.

Złącza lutowane, w przypadku których występuje zjawisko Kirkendalla pękają zazwyczaj wzdłuż obszarów obfitujących w luki. Przykłady pęknięć łączących luki Kirkendalla i propagowanych wzdłuż granicy ziaren lutu SnAgCu na powłoce ENIG zaprezentowano na rysunku 3.10 [49].



Rysunek 3.10: Pęknięcia propagowane wzdłuż granic ziaren łączące luki Kirkendalla oraz mikropęknięcia struktury (C.-T. Peng, Nokia)

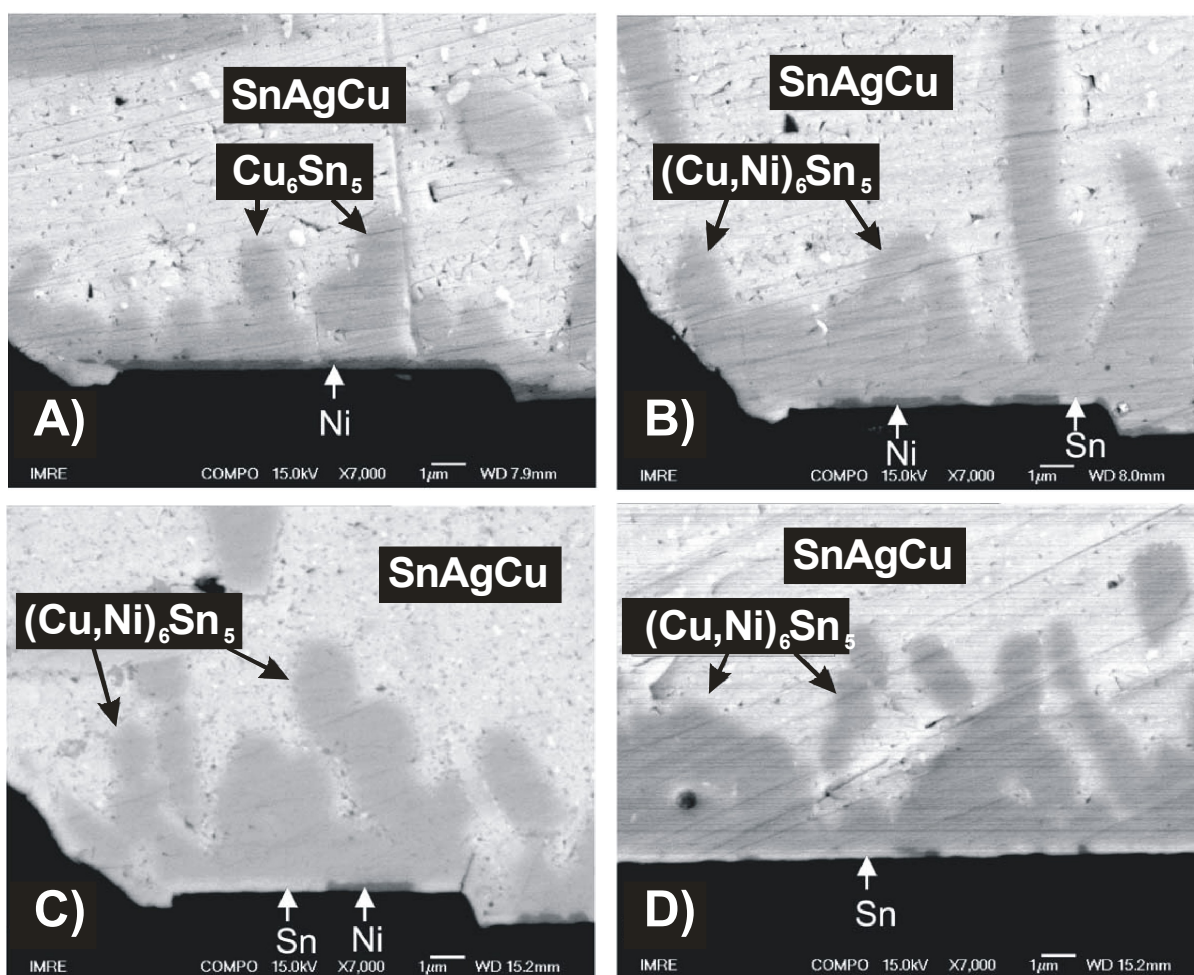
Skala występowania zjawiska Kirkendalla jest ściśle związana z wielkością ziaren powłoki pola lutowniczego lub powłoki wyprowadzenia elementu oraz różnicą współczynników dyfuzji sąsiadujących faz oraz metali. Niewielkie ziarna umożliwiają rozproszenie wakansów w warstwie bezpośrednio sąsiadującej z warstwą fazy międzymetalicznej, uniemożliwiając ich koalescencję [42]. Pojedyncze luki w większości przypadków mają rozmiary w granicach od kilkuset nm do kilkunastu μm [44].

3.4 Zjawisko łuszczenia warstw faz międzymetalicznych

Niezależnie od opisanych wyżej efektów na granicy lut – podłoże, w złączu lutowanym może również występować zjawisko łuszczenia faz międzymetalicznych odpowiedzialnych za przyczepność lutu do podłoża, co może prowadzić do obniżenia wytrzymałości mechanicznej złącza lutowanego [6].

Po zastąpieniu eutektycznego stopu SnPb stopami bezołowiowymi SnAgCu zaobserwowano zjawisko łuszczenia warstw faz międzymetalicznych złączy wykonanych na powłokach zawierających nikiel i poddawanych wielokrotnym procesom lutowania rozpliwowego. Łuszczenie warstw faz międzymetalicznych stanowi szczególnie istotny problem w przypadku niewielkich złączy lutowanych (rzędu 100-120 μm) wyprowadzeń sferycznych flip-chip.

Podczas badań doświadczalnych zaobserwowano łuszczenie fazy międzymetalicznej złączy flip-chip (stop SnAgCu) wykonanych na wielowarstwie Al/Ni(V)/Cu metalizacji podłoża krzemowego [50]. W wyniku pierwszego procesu topnienia na granicy łączonych faz formuje się faza międzymetaliczna Cu_6Sn_5 , odpowiedzialna za przyczepności lutu do podłoża [6]. Po przeprowadzeniu kilku kolejnych procesów topnienia złącza w temperaturze 260°C , w warstwie fazy Cu_6Sn_5 zaczyna być zauważalna niewielka ilość niklu. Wraz z kolejnymi procesami topnienia nowo powstała faza międzymetaliczna $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ zwiększa swoją objętość, a jej początkowy kształt, przybierający formę okrągłych i zwartych cząstek, zmienia się w wydłużone ziarna igłowe. Po przeprowadzeniu około 20 procesów topnienia złącza część ziaren ulega przemieszczeniu w kierunku spoiwa. Zaobserwowany proces przypomina proces łuszczenia. Przebieg procesu formowania i łuszczenia się warstwy fazy $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ przedstawiono na rysunku 3.11.



Rysunek 3.11: Proces formowania i łuszczenia fazy międzymetalicznej: A) po jednym, B) po pięciu, C) po dziesięciu, D) po dwudziestu procesach lutowania rozpliwowego (M. Li, Institute of Materials Research and Engineering, Singapore)

Podobny efekt można uzyskać poddając złącza lutowane procesowi wygrzewania

w temperaturze 260°C przez 20 minut [31].

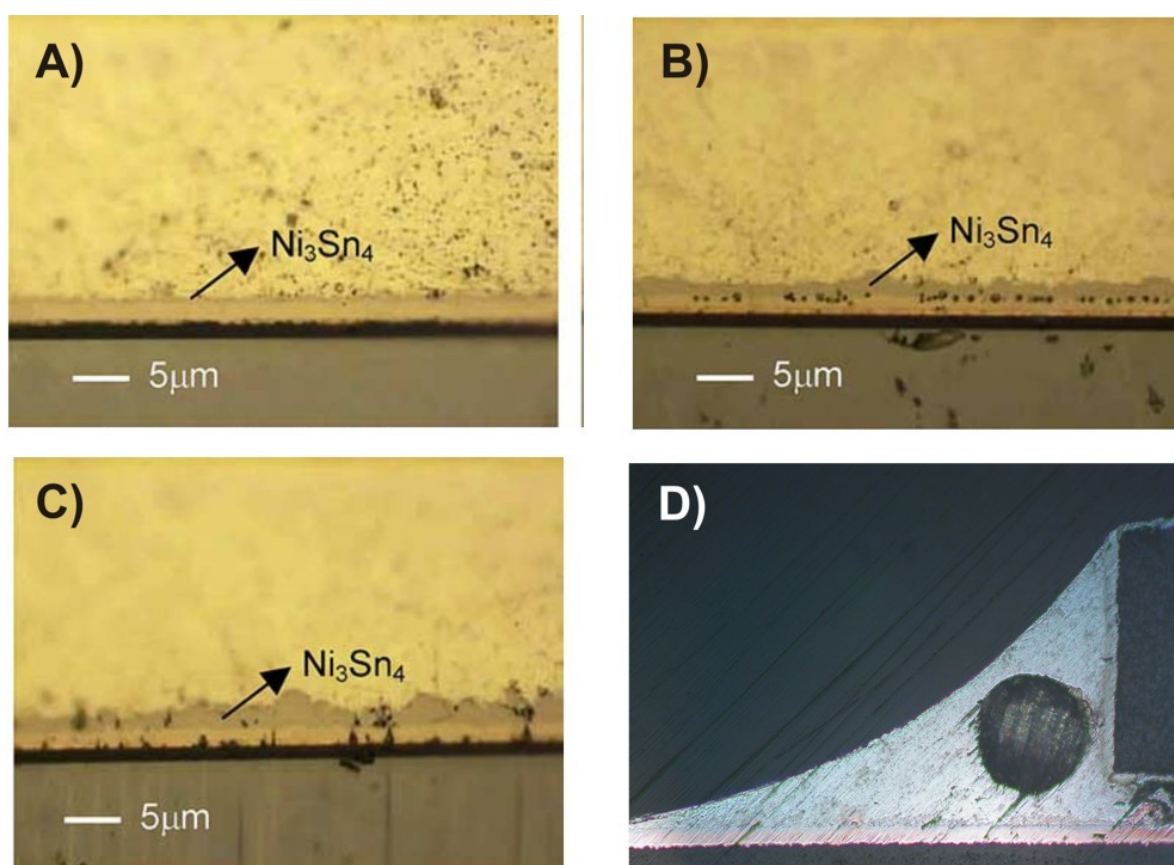
3.5 Metody badania składu i struktury faz międzymetalicznych

Diagnostyka złącza, mająca na celu ujawnienie obecności dotychczas opisanych defektów i zjawisk, wymaga kompleksowej oceny struktury złącza lutowanego. W celu obserwacji struktury złącza, w tym struktury faz międzymetalicznych, wykonywane są zglądy metalograficzne złączy lutowanych z użyciem maszyn szlifiersko-polarskich i wodoodpornych papierów ściernych o gradacji z zakresu od kilkuset do 2500 (liczba ta oznacza liczbę ziaren materiału ściernego na cm^2). Końcowym etapem preparacji zglądów jest ich polerowanie przy użyciu coraz to drobniejszych proszków polerskich, np. alundowych (wielkość ziarna 5 μm), diamentowych (wielkość ziarna 0,25 μm) i innych, w celu uzyskania jakości powierzchni umożliwiającej obserwację mikrostruktury złącza [51].

Aby umożliwić obserwacje powstałych faz międzymetalicznych wypolerowaną powierzchnię zglądów poddaje się działaniu roztworów kwasów w celu selektywnego mikrotrawienia, mającego na celu chemiczne usunięcie osnowy stopu lutowniczego, nie biorącej udziału w reakcji formowania faz międzymetalicznych. W zależności od składu fazy międzymetalicznej, składu stopu lutowniczego czy też pożądanego stopnia uwydatnienia fazy międzymetalicznej stosuje się różne roztwory trawiące oraz różne czasy trwania procesu trawienia.

W celu uzyskania jedynie kontrastu między fazami międzymetalicznymi a stopem lutowniczym badany zgląd poddaje się krótkotrwałemu (kilkadziesiąt sekund) selektywnemu podtrawianiu w wodnych roztworach kwasów. Stosując np. mieszaninę wodnego roztworu (92% H_2O) stężonego kwasu azotowego (6% HNO_3) oraz stężonego kwasu chlorowodorowego (2% HCl) możliwe jest uwydatnienie warstw fazy Cu_6Sn_5 na tle stopu $\text{Sn}_{3,5}\text{Ag}_{0,7}\text{Cu}_{0,2}\text{Sb}$ [51]. Inną metodą eksponowania faz międzymetalicznych jest głębokie trawienie w roztworze wodnym kwasu wspomaganie ultradźwiękami. Stosując wodny roztwór stężonego kwasu azotowego (5% HNO_3) można chemicznie usunąć stopy $\text{Sn}_{3,5}\text{Ag}$ oraz $\text{Sn}_{3,5}\text{Ag}_{0,7}\text{Cu}$ pozostawiając warstwy fazy Ag_3Sn [52]. Proces polerowania jako proces mechanicznego usuwania materiału może istotnie wpływać na morfologię badanych faz obserwowaną na polerowanej płaszczyźnie. Niepożądany efekt rozcierania materiału można zniwelować przez krótkie, trwające od kilku do kilkunastu sekund podtrawianie w roztworze stężonego kwasu chlorowodorowego w metanolu (5% HCl), odsłaniając tym samym powierzchnię, która nie była objęta ingerencją podczas procesu polerowania [46].

Do przeprowadzenia analizy faz międzymetalicznych stosuje się szeroki wachlarz specjalistycznych urządzeń, począwszy od optycznych mikroskopów metalograficznych [43], [46] i polaryzacyjnych [49], przez elektronowe mikroskopy skaningowe (SEM – ang. Scanning Electron Microscopy) [45], [46], [51], [52] i transmisyjne (TEM – ang. Transmission Electron Microscopy) a skończywszy na mikroanalizatorach rentgenowskich (EDS – ang. Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) [43], [45], [46], [49], [51], [52], dyfraktometrach rengenowskich (XRD – X-Ray Diffraction) [53] czy też mikrotomografach komputerowych [54], [55]. Cel badań określa wybór urządzenia.

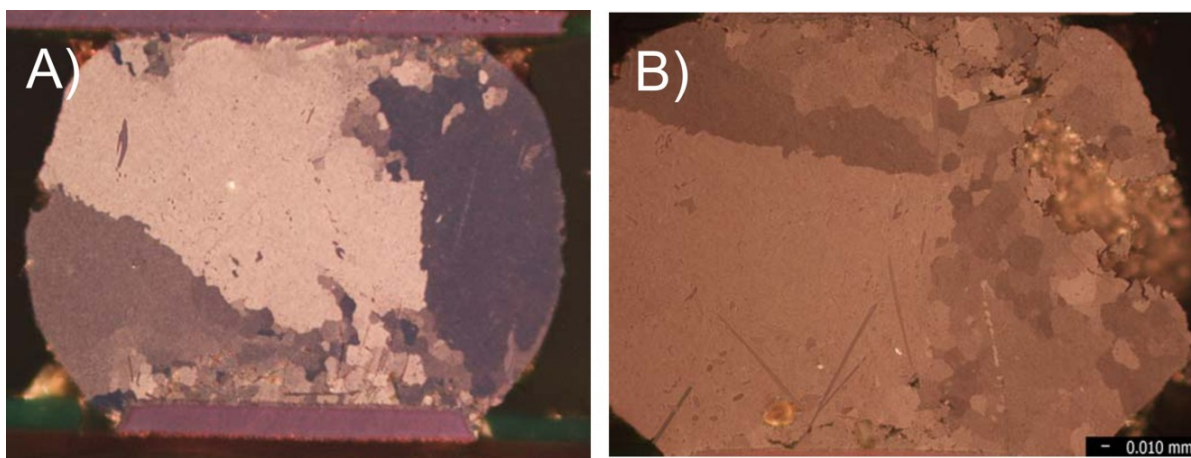


Rysunek 3.12: Mikrostruktury obserwowane w mikroskopie optycznym po procesach wygrzewania w temperaturze $150^{\circ}C$: A) złącze lutowane Sn96.5Ag3.5 po 24 godzinach wygrzewania [43], B) po 480 godzinach wygrzewania [43], C) po 1000 godzinach wygrzewania [43], D) złącze lutowane Sn96.5Ag3.0Cu0.5/ENIG po 600 godzinach wygrzewania z widocznym pęcherzem wynikającym z błędów technologicznych procesu lutowania (źródło własne)

Wstępną ocenę struktury złącza lutowanego przeprowadza się wykorzystując optyczne mikroskopy metalograficzne. Badania przy wykorzystaniu mikroskopów metalograficznych umożliwiają zarówno wykrycie defektów makroskopowych, wynikających z błędów technologicznych podczas procesu montażu, jak np. brak zwilżalności lutowanych powierzchni, ubytki lutu, pęknięcia elementów, jak i obserwacje wtrąceń, mikropęknięć.

Analiza umożliwia przeprowadzenie wstępnej diagnozy dotyczącej jakości przeprowadzonego procesu lutowania. Obraz przykładowych struktur zarejestrowanych przy wykorzystaniu optycznego mikroskopu metalograficznego pokazano na rysunku 3.12.

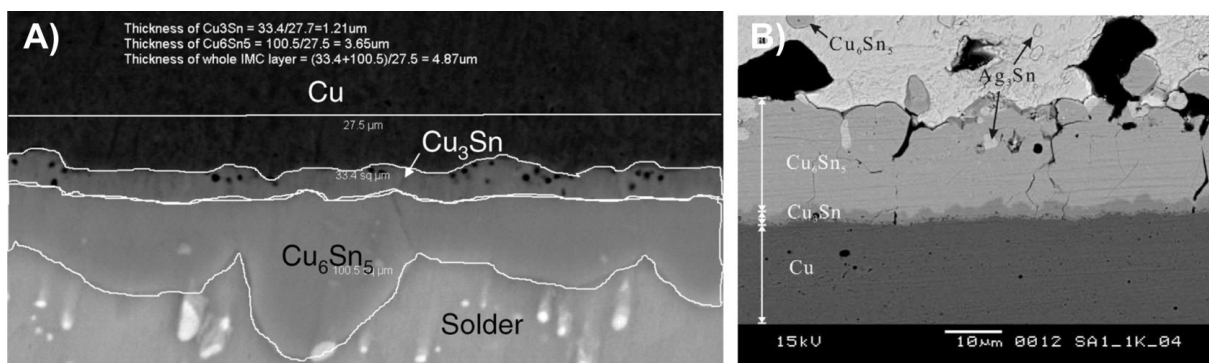
W celu wstępnej oceny wielkości ziaren struktury złącza lutowanego i ich wzajemnej orientacji krystalograficznej stosuje się optyczne mikroskopy polaryzacyjne. Spolaryzowane światło umożliwia obserwacje zmian fazowych występujących w anizotropowych obiektach i wstępne oszacowanie obszarów występowania faz międzymetalicznych. Obraz przykładowych struktur zarejestrowanych przy użyciu optycznego mikroskopu polaryzacyjnego pokazano na rysunku 3.13.



Rysunek 3.13: Obrazy w mikroskopie polaryzacyjnym: A) spolaryzowane światło umożliwia uwidocznienie granic ziaren oraz różnicy ich orientacji krystalograficznej, $\text{Sn}_{3.8}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}$ [49], B) obserwacja obszarów rekrytalizacji oraz rozległego uszkodzenia spowodowanego tuszczeniem złącza, $\text{Sn}_{3.8}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}$ [49]

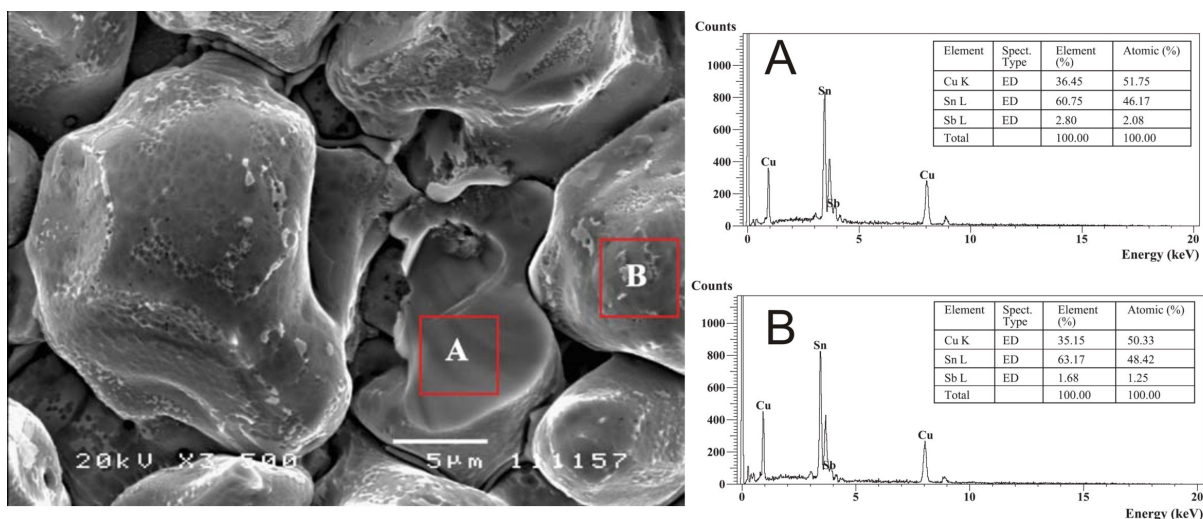
W celu precyzyjnego określenia morfologii badanych faz międzymetalicznych wykorzystuje się elektronowe mikroskopy skaningowe [53]. Na podstawie obserwacji powierzchni zgładów można z dużym prawdopodobieństwem zlokalizować fazy międzymetaliczne, określić grubość warstw poszczególnych faz metalicznych i międzymetalicznych oraz ocenić ich strukturę pod kątem ewentualnych defektów, takich jak mikropełnięcia czy też luki Kirkendalla. W celu określenia składu zlokalizowanych faz wymagane jest przeprowadzenie uzupełniających badań, np. mikroanalizy rentgenowskiej lub dyfraktometrii rentgenowskiej.

W celu określenia średniej grubości warstw stosuje się techniki cyfrowego przetwarzania uzyskanych obrazów [46]. Obrazy przykładowych struktur zarejestrowane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego pokazano na rysunku 3.14.



Rysunek 3.14: Obrazy mikrostruktur zarejestrowane w skaningowym mikroskopie elektronowym: A) określanie grubości warstw faz międzymetalicznych, luki Kirkendalla w warstwie Cu₃Sn, złącze lutowane SnAgCu/OSP/Cu po procesie wygrzewania w temperaturze 150°C przez 100 godzin [45], B) warstwy faz międzymetalicznych z widocznymi otworami, złącze lutowane SnAg/Cu po procesie wygrzewania w temperaturze 170°C przez 1000 godzin [45]

Mikroanaliza rentgenowska, zwana inaczej spektroskopią rentgenowską dyspersyjną (EDS – ang. Electron Dispersion Spectroscopy), umożliwia jakościową i ilościową analizę chemiczną składu powierzchni. Rozdzielczość przestrzenna mikroanalizy rentgenowskiej rzędu 0,5 μm umożliwia precyzyjne określenie składu chemicznego nawet cienkich warstw faz międzymetalicznych oraz obszarów granicznych. Na podstawie przeprowadzonej analizy składu powierzchni można przewidywać skład atomowy fazy międzymetalicznej. Jednak aby mieć pewność, jaka faza międzymetaliczna poddawana jest analizie należy przeprowadzić badania wykorzystując dyfraktometr rentgenowski. Przykładowe wyniki mikroanalizy rentgenowskiej składu wybranych ziaren zamieszczono na rysunku 3.15.



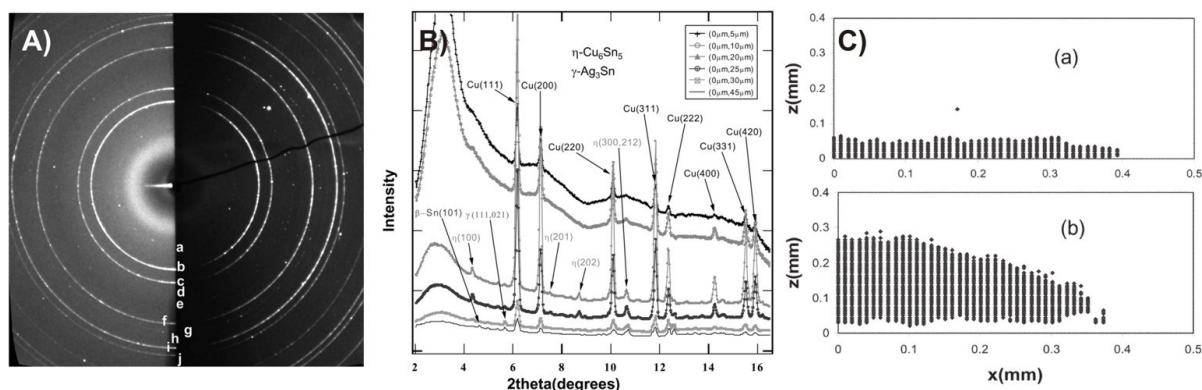
Rysunek 3.15: Widok ziaren fazy Cu₆Sn₅ po procesie wygrzewania złącza lutowanego Sn3.5Ag0.7Cu1.55Sb/Cu w temperaturze 250°C przez 1 godzinę oraz wyniki mikroanalizy rentgenowskiej składu ziaren A i B [51]

Metody dotychczas wymienione uzupełniają się wzajemnie, dają możliwość przeprowadzenia pełnej i precyzyjnej analizy złączy lutowanych zarówno pod względem morfologii poszczególnych faz, ich składu chemicznego, jak również pod względem występujących defektów. Precyzja tych analiz okupiona jest jednak koniecznością przeprowadzania czasochłonnych zabiegów, mających na celu przygotowanie badanych próbek (np. wykonanie zgładów o bardzo małej chropowatości, przeprowadzenie procesu podtrawiania lub głębokiego trawienia). Przygotowanie próbek badawczych jest procesem niszczącym, w związku z czym możliwość przeprowadzania dalszych, dodatkowych badań wykorzystując te same próbki jest znacznie ograniczona. Alternatywą wymienionych badań niszczących są badania nieniszczące oparte na dyfraktometrii rentgenowskiej i mikrotomografii komputerowej, które uzupełniają się umożliwiają zarówno przeprowadzenie pełnej analizy, jak i poddawanie badanych złączy lutowanych dalszym testom, np. elektrycznym, wibracyjnym, itp. Nieniszczący sposób prowadzenia badań okupiony jest niestety ich mniejszą precyzją (np. obrazy tomograficzne ukazują mniej szczegółów niż zdjęcia zgładów metalograficznych wykonane elektronowym mikroskopem skaningowym).

Dyfraktometria rentgenowska (XRD – ang. X-Ray Diffraction) umożliwia jakościową i ilościową analizę fazową badanych struktur. Na podstawie przeprowadzonej analizy fazowej możliwa jest identyfikacja materiałów występujących w postaci krystalicznej, określenie kierunku orientacji sieci krystalicznej w badanej próbce oraz ich wielkości na podstawie otrzymanych dyfraktogramów. Przeprowadzenie analizy porównawczej dyfraktogramów z pomiarami zebranych w bazie JCPDS-ICDD (z ang. Joint Committee on Powder Diffraction Standards International Centre for Diffraction Data) umożliwia precyzyjne określenie składu oraz parametrów sieci krystalicznej uformowanych faz międzymetalicznych oraz dowolnych innych obszarów powierzchni złącza lutowanego. Przykład obrazu dyfrakcyjnego obszaru granicznego między stopem lutowniczym SnAgCu a kontaktem pokrytym powłoką ochronną ENIG przedstawiono na rysunku 3.16A. Obraz dyfrakcyjny wskazuje, iż badana struktura jest mieszaniną drobnych krystalicznych tworów oraz większych kryształów [53]. Każdy z zaobserwowanych prążków odpowiada innej fazie międzymetalicznej lub metalowi o innej orientacji krystalograficznej.

Wyniki jakościowej analizy przedstawione zostały na rysunku 3.16B [31]. Na podstawie wyników analizy jakościowej można określić kolejność występowania poszczególnych faz oraz określić przestrzenne rozmieszczenie warstw faz, stanowiących przedmiot badań.

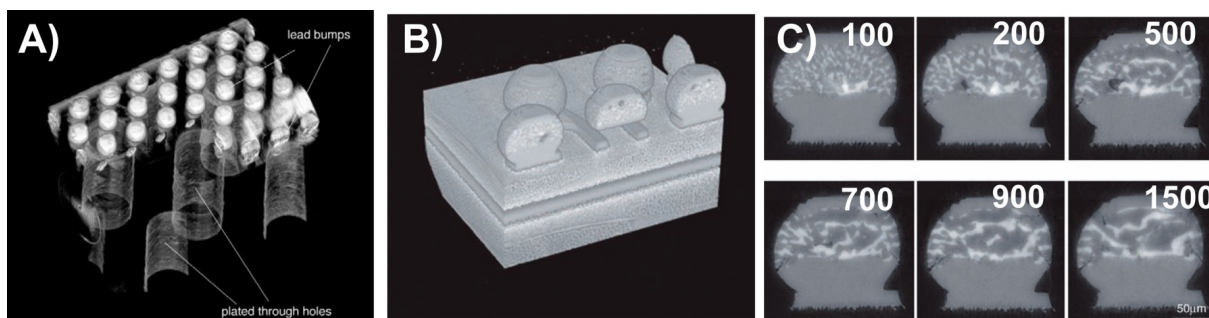
Przykłady przestrzennego rozmieszczenia warstw SnCu oraz SnAg zaprezentowano na rysunku 3.16C [31].



Rysunek 3.16: A) Uzyskany obraz dyfrakcyjny ziaren z widocznymi prążkami dyfrakcyjnymi, B) wyniki analizy jakościowej z widocznymi pikami odpowiadającymi poszczególnym fazom dla różnych głębokości prowadzonych analiz, C) przestrzenne rozmieszczenie warstwy SnCu oraz SnAg [53]

Mikrotomograf komputerowy umożliwia przeprowadzanie analiz przekrojów poprzecznych złączy lutowanych bez konieczności wykonywania zglądów metalograficznych. Uzyskane wyniki mogą stanowić uzupełnienie wyników badań otrzymanych metodą dyfraktometrii rentgenowskiej, umożliwiając tym samym kompleksową analizę badanych złączy. Dzięki zastosowaniu promieniowania rentgenowskiego, detektorów o dużej czułości i wysokim kontraście oraz precyzyjnemu mechanizmowi manipulatorów możliwe jest uzyskanie trójwymiarowego obrazu, stanowiącego rekonstrukcję badanego złącza. Uzyskany trójwymiarowy obraz złącza umożliwia przeprowadzenie analizy powierzchni obrazów tomograficznych (przekrojów) wyznaczonych przez płaszczyzny przecinające złącze pod dowolnym kątem. Użycie mikrotomografu komputerowego umożliwia ujawnienie wewnętrznych defektów (pęknięcia, otwory) badanej struktury. Dodatkowo, dzięki zastosowaniu dedykowanego oprogramowania jest możliwe przeprowadzenie analizy ilościowej i jakościowej wybranych defektów występujących w złączu lutowanym. Rezultaty przeprowadzonych analiz mogą być przydatne w przypadku określania istotnych płaszczyzn, w których dokonuje się zglądów badanych złączy, dla przeprowadzenia dalszych znacznie dokładniejszych analiz struktury wykorzystując np. elektronowe mikroskopy skaningowe. Przykłady obrazów przestrzennych złączy sferycznych BGA (ang. Ball Grid Array) pokazano na rysunkach 3.17A [55] oraz 3.17B [54]. Ponadto na rysunku 3.17C przedstawiono przykładowe obrazy tomograficzne złącza, które było poddawane cyklowi temperaturowemu [54]. Specyfika badań umożliwia dokładną analizę powierzchni wyznaczonej zawsze przez tą samą płaszczyznę przekroju, co istotnie wpływa na

wiarygodność prowadzonych analiz.



Rysunek 3.17: Obrazy uzyskane w mikrotomografii komputerowej: A) obraz 3D odwzorowujący strukturę flip-chip oraz przelotowe otwory metalizowane [55], B) obraz 3D struktury flip-chip [54], C) obraz tomograficzny złącza poddawanego cykлом temperaturowym [54]

4 Obiekty testów i program badań

4.1 Materiały i technologia wykonania testowych złączy lutowanych

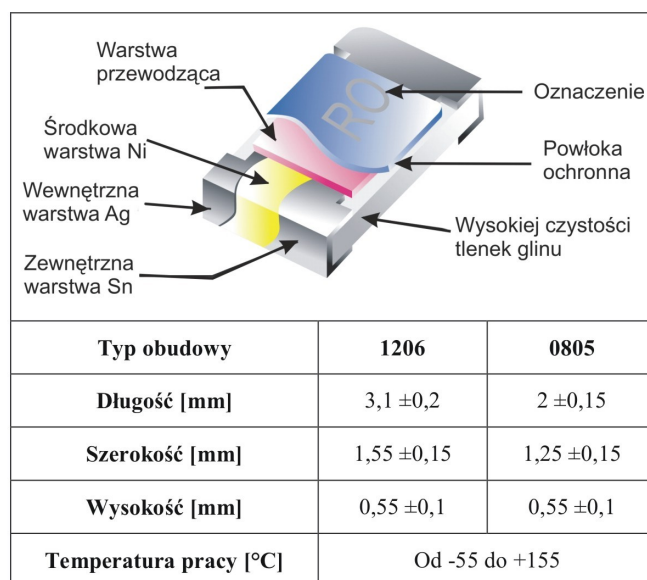
4.1.1 Lutowanie rozpliwowe

Montaż elementów elektronicznych i układów scalonych na płytkach obwodów drukowanych odbywa się głównie w procesie lutowania, przy czym w produkcji seryjnej stosuje się zmechanizowane metody lutowania – lutowanie zanurzeniowe (na fali) i lutowanie rozpliwowe. W metodzie lutowania na fali lut i ciepło przykładane są jednocześnie do części przeznaczonych do łączenia. W drugiej metodzie, stosowanej w niniejszej pracy, lut a dokładniej pasta lutownicza, aplikowana jest przed dostarczeniem ciepła. Pasty lutownicze są homogenicznymi mieszaninami proszku lutowniczego (o granulacji kilkudziesięciu μm) i topnika. Topnik jest materiałem aktywnym - koniecznym do prawidłowego wykonania złącza lutowanego - przy czym nie tworzy i nie wbudowuje się w złącze. Dodatkowo, w paście lutowniczej topnik odgrywa rolę nośnika proszku metalicznego i decyduje o właściwościach fizykochemicznych i technologicznych pasty, takich jak lepkość, tiksotropia, kleistość, koalescencja, osiadanie oraz zwilżalność powierzchni elementów łączonych, a tym samym wpływa na wynik lutowania.

Proces zmechanizowanego lutowania rozplwowego polega na formowaniu złącza lutowanego w procesie topienia ziaren stopu bezolowiowego zawartych w paście lutowniczej, nałożonej najczęściej metodą druku przez szablon na pola lutownicze płytki obwodu drukowanego. Płytkę obwodu drukowanego z osadzonymi na paście lutowniczej podzespołami do montażu powierzchniowego przechodzi przez piec, w którym dostarczane 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 złącza lutowanego.

Do badań użyto materiałów i technologii standardowo stosowanych w polskim przemyśle elektronicznym. Umożliwi to bezpośrednie wdrożenie przez producentów urządzeń elektrycznych i elektronicznych zaleceń, wynikających z badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy.

Do wszystkich testów stosowano elementy do montażu powierzchniowego (SMD) o zerowej rezystancji, tzw. zwory. Wybrano zwory firmy Royal Ohm o dwóch rozmiarach oznaczonych jako 1206 i 0805 [56]. Budowę zwory pokazano na rysunku 4.1.

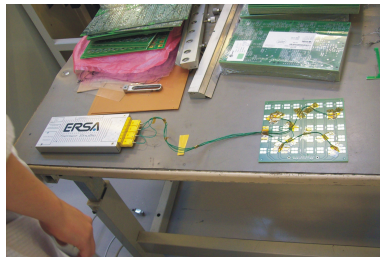


Rysunek 4.1: Schemat budowy i podstawowe rozmiary zwoy SMD (Royal Ohm, dokumentacja techniczna) [56]

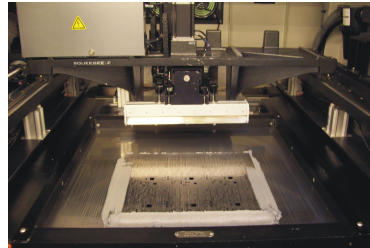
Obiektem badań doświadczalnych są złącza lutowane na powierzchni płytek obwodów drukowanych. Testowe płytki poddawane badaniom zróżnicowano pod względem składu zastosowanych powłok zabezpieczających oraz stopów lutowniczych.

Dostosowanie nastaw pieca do profilu temperaturowo-czasowego lutowania pasty

Profilometr
ERSA

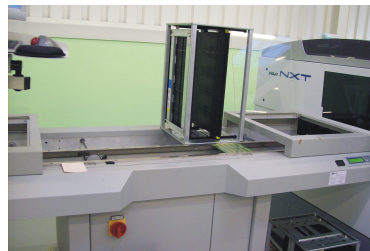


Sitodrukarka
MPM MOMENTUM



Sitodruk
pasty lutowniczej
na polach
lutowniczych POD

Linia transportu
ASYS



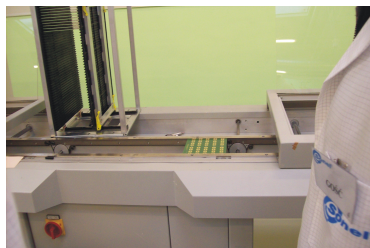
Transport
POD

6 modułowy automat
FUJI NXT



Rozmieszczanie
elementów
na POD

Linia transportu
ASYS



Transport
POD

Piec wielostrefowy
ERSA HOTFLOW2/20



Lutowanie
rozpływowe

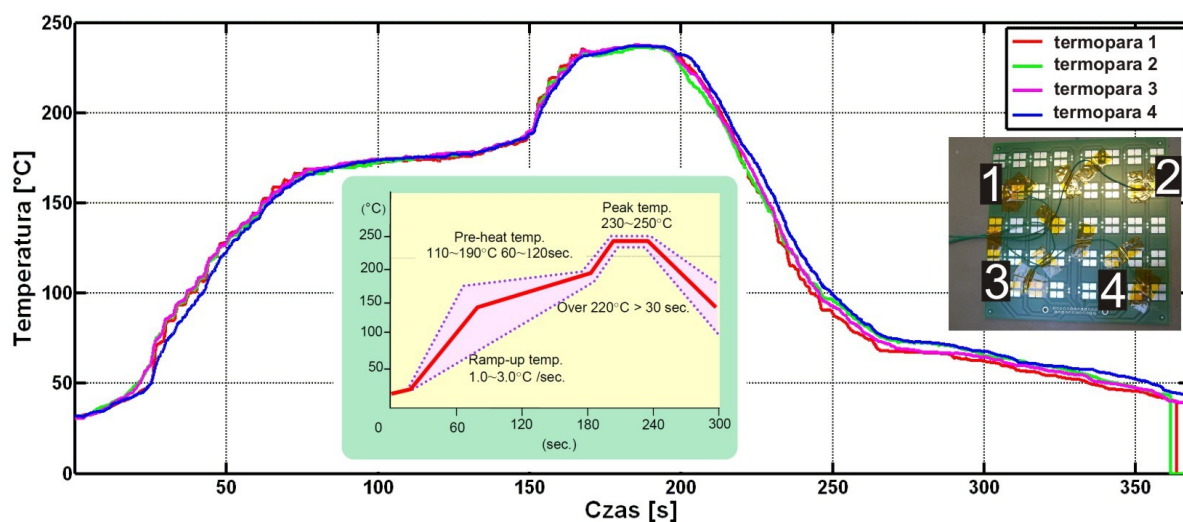
Rysunek 4.2: Schemat przebiegu procesu montażu zwór SMD na powierzchni płytek obwodów drukowanych (POD) (dokumentacja techniczna, SONEL) [57]

Do przeprowadzenia procesu lutowania użyto profesjonalnej komercyjnej linii do lutowania rozpliwowego dostępnej w firmie SONEL. Firma SONEL [57] jest krajowym producentem przyrządów pomiarowych dla elektroenergetyki i telekomunikacji. Ponadto firma oferuje usługi profesjonalnego montażu powierzchniowego (SMT, ang. Surface Mount Technology) oraz przewlekanego (THT, ang. Through-Hole Technology).

Kolejne etapy procesu montażu przedstawiono na rysunku 4.2.

Przed przystąpieniem do procesu lutowania przeprowadzono procedurę regulacji wielostrefowego pieca, w celu uzyskania zgodności między profilem temperaturowym pieca a zaleceniami producentów użytych past lutowniczych. Do sprawdzenia poprawności nastaw pieca (prędkość transportera, temperatura poszczególnych stref) użyto profilometru oraz zestawu termopar, które przytwierdzono do powierzchni jednej z płytek testowych. Płytkę z termoparami oraz profilometrem została przetransportowana przez wszystkie strefy pieca zgodnie z nastawami pieca.

Charakterystykę temperaturowo-czasową pieca zarejestrowaną przez termoprofilometr podczas przygotowań do lutowania pastą SAC oraz profil zalecany (różowe pole) przez jej producenta zaprezentowano na rysunku 4.3.

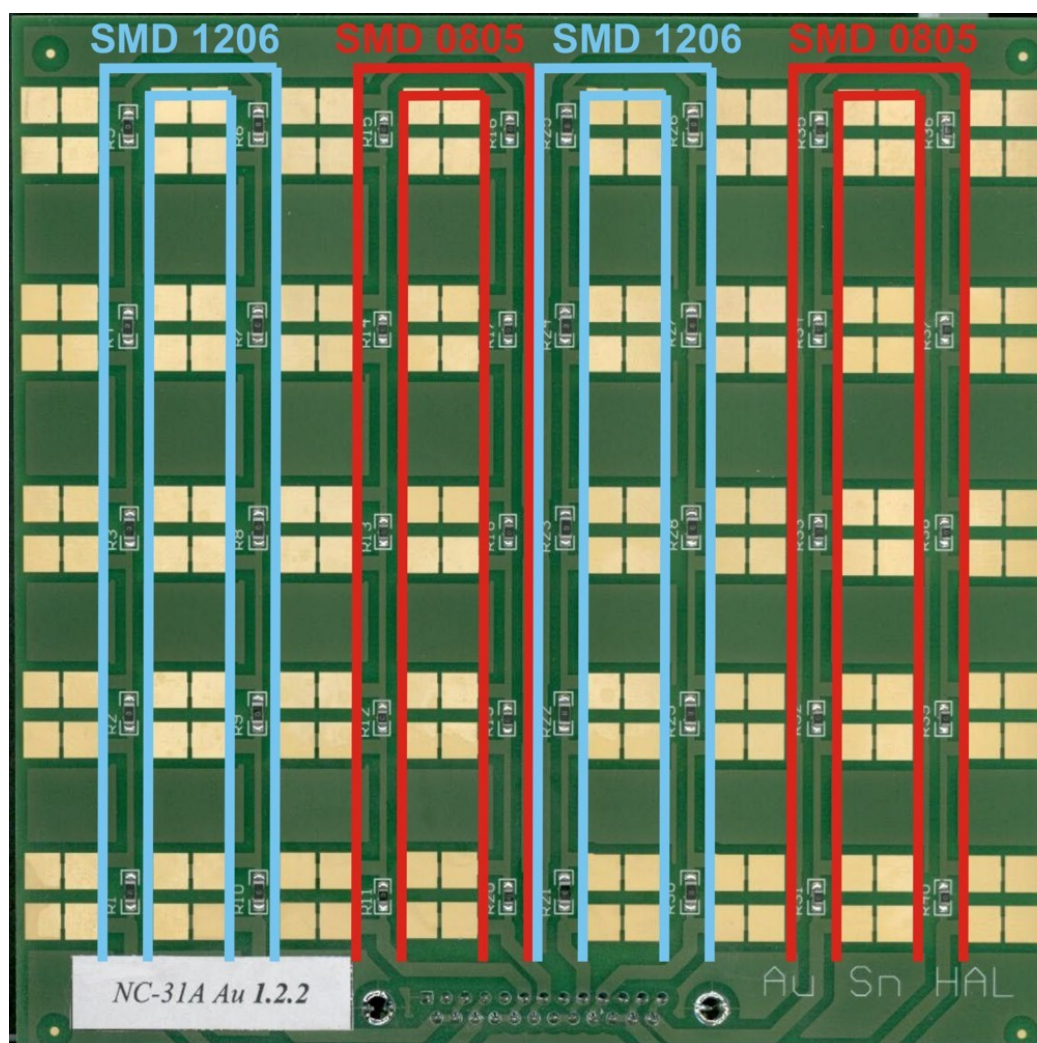


Rysunek 4.3: Charakterystyka temperaturowo-czasowa procesu lutowania pasty SAC zarejestrowana przez 4 termopary przyklejone do powierzchni płytki testowej, zgodna z profilem temperaturowym rekomendowanym przez producenta pasty (dokumentacja techniczna, KOKI)

4.1.2 Płytki obwodów drukowanych

Testowe płytki obwodów drukowanych zaprojektowano tak, aby możliwy był pomiar rezystancji elektrycznej złączy lutowanych zwór SMD montowanych na ich powierzchni.

Według opracowanego projektu na powierzchni każdej płytki testowej zamontowano 20 zwór SMD typu 1206 oraz 20 zwór 0805. Zwory połączone szeregowo uzyskując cztery niezależne łańcuchy: dwa łańcuchy połączonych szeregowo zwór 1206 oraz dwa łańcuchy połączonych szeregowo zwór 0805. Rozmieszczenie łańcuchów elementów na płytce testowej pokazano na rysunku 4.4.



Rysunek 4.4: Łańcuchy zwór SMD na płytce obwodów drukowanych

W programie badań przewidziano wielokrotne pomiary rezystancji każdej przylutowanej zwory (2 złącza lutowane) w warunkach statycznych, jak również pomiary rezystancji łańcuchów składających się z 10 szeregowo połączonych zwór (20 złączy lutowanych) w warunkach zmiennych obciążeń mechanicznych i termicznych. Dlatego w sąsiedztwie każdej zwory rozmieszczono cztery pola kontaktowe, umożliwiające przeprowadzenie pomiarów rezystancji metodą czteropunktową. W przypadku płytek poddawanych w dalszej części badań testom niezawodności, w pobliżu krawędzi przylutowano złącza kątowe D-Sub firmy Ninigi umożliwiające przeprowadzenie pomiarów rezystancji łańcuchów zwór metodą

czteropunktową [58]. Złącza przylutowano ręcznie wykorzystując eutektyczny stop SnPb. Planowano, że badaniom zostanie poddanych łącznie 960 łańcuchów. Płytki testowe mają wymiar 150 x 150 mm.

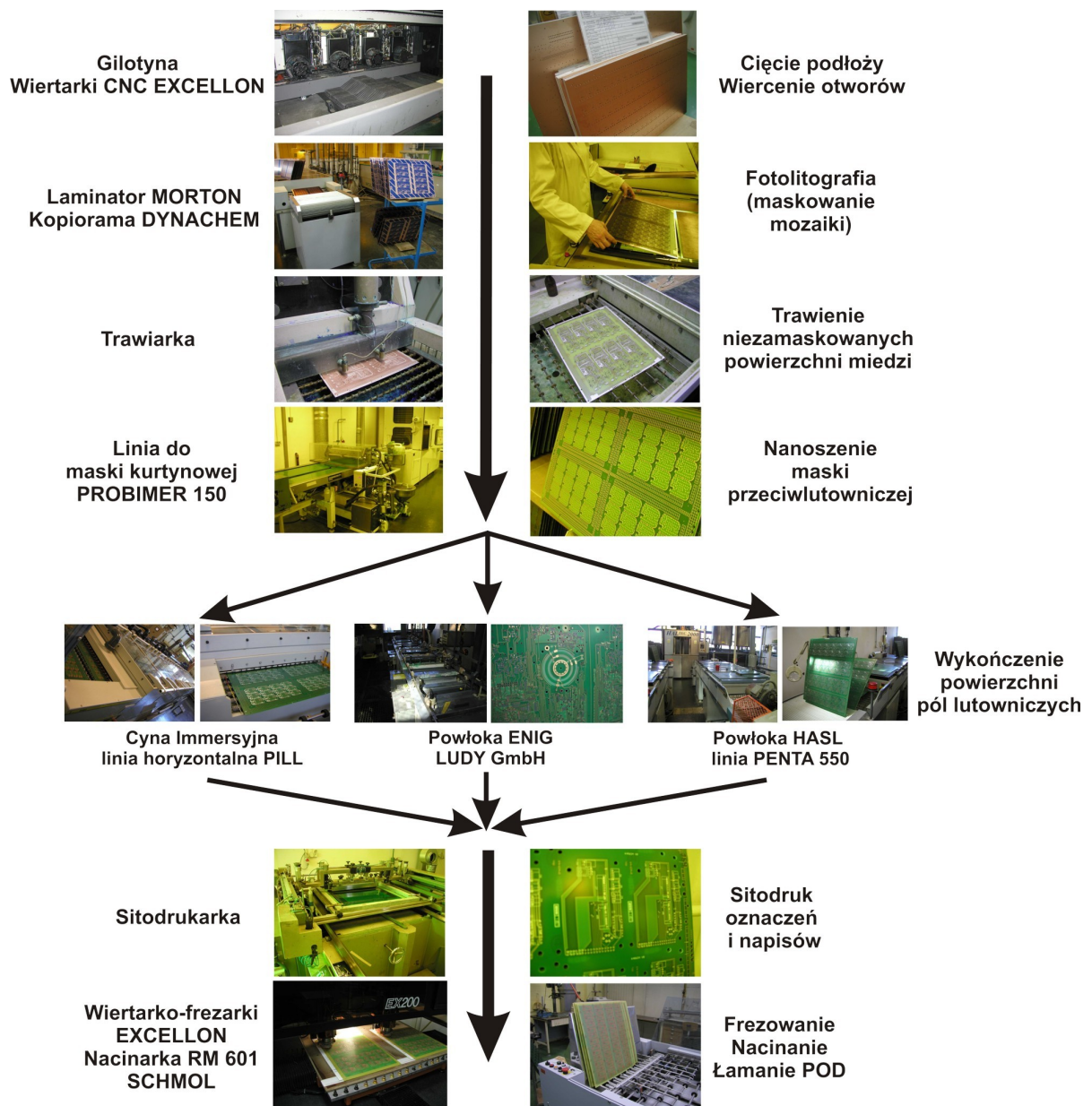
Do produkcji testowych płytek obwodów drukowanych użyto standardowego laminatu FR4, składającego się z żywicy epoksydowej wzmocnionej tkaniną z włókien szklanych, powszechnie stosowanego w produkcji sprzętu elektronicznego. Podstawowe parametry tego laminatu zamieszczono w tabeli 4.1. Dane zostały zebrane na podstawie dokumentacji technicznej dostarczanej przez producenta laminatu, firmę ISOLA [59].

Producent / model	ISOLA / ED130UV
Material laminatu	Żywica epoksydowa wzmocniana włóknami szklanymi E-glass
Grubość laminatu	1,5 mm
Grubość folii miedzianej	(laminat jednostronny) 35 μ m
Temperatura zeszklenia T_g	135°C
Współczynnik rozszerzalności liniowej CTE	(Oś X) 14 ppm/°C (Oś Y) 13 ppm/°C (Oś Z) 170 ppm/°C
Moduł sprężystości	(Wzdłużny) 24,1 GPa (Poprzeczny) 20,7 GPa

Tabela 4.1: Podstawowe parametry laminatu użytego do produkcji testowych płytek obwodów drukowanych (dokumentacja techniczna, ISOLA) [59]

Płytki wykonano w firmie ELDOS, wiodącym krajowym producencie płytek obwodów drukowanych. Kolejne operacje technologiczne procesu produkcji testowych płytek obwodów drukowanych pokazano na rysunku 4.5 [60].

Po opuszczeniu linii produkcyjnej płytki poddano inspekcji zgodnej z normą IPC-6012 [61] oraz normą IPC-A-600 [62]. Bezpośrednio po przeprowadzeniu inspekcji płytki testowe zapakowano próżniowo, w celu zabezpieczenia ich powłok przed utlenianiem oraz przed dostępem wilgoci z atmosfery. Zabezpieczone płytki przetransportowano do producenta urządzeń elektronicznych w celu przeprowadzenia procesu montażu elementów SMD na ich powierzchni.



Rysunek 4.5: Schemat przebiegu procesu produkcji testowych płytek obwodów drukowanych (dokumentacja techniczna, ELDOS) [60]

4.1.3 Wybrane powłoki ochronne pól lutowniczych płytek obwodów drukowanych

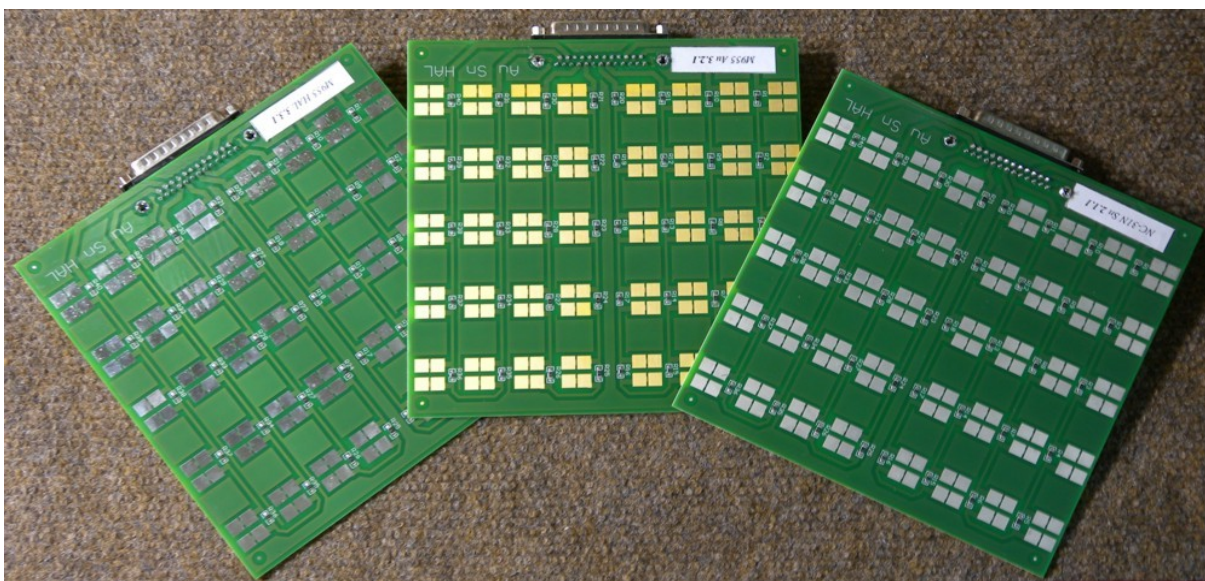
Na rysunku 4.5 pokazano etapy procesu produkcyjnego płytek obwodów drukowanych polegające na wytrawianiu miedzi, nanoszeniu maski przeciwlutowniczej i pokryciu nieosłoniętego maską pola lutowniczego powłoką ochronną.

Wybrano następujące powłoki lutownicze:

- złota immersyjnego o grubości 0,07–0,12 μm na warstwie niklu nanoszonego metodą bezprądową (ENIG) o grubości 4-6 μm ,

- bezołowiowego stopu lutowniczego $\text{Sn}_{0,3}\text{Ag}_{0,06}\text{Ni}_{0,01}\text{Ge}$ naniesionego metodą HASL,
- cyny immersyjnej (ImSn) o grubości 0,8-1,2 μm .

Wyboru powłok ochronnych dokonano biorąc pod uwagę ich stosowalność w przemyśle elektronicznym. Jak wspomniano w rozdziale 2.2.4 powłoka ENIG, ze względu na koplanarność, jest stosowana w przypadku lutowania elementów z małą podziałką np. 0,65 mm (tzw. fine-pitch). Cyna immersyjna jest powłoką tańszą od powłoki ENIG, również koplanarną. Niestety jest mniej odporna na utratę lutowności ze względu na podatność na utlenianie. Powłoka stopu bezołowiowego nakładana metodą HASL jest powszechnie stosowana jedynie w przypadku elementów z dużą podziałką ze względu na jej stosunkowo niski koszt. Nie jest stosowana w przypadku elementów z małą podziałką ze względu na jej nierówną powierzchnię. Płytki testowe, których pola lutownicze pokryto różnymi powłokami pokazano na rysunku 4.6.



Rysunek 4.6: Płytki testowe różniące się powłokami pól lutowniczych (od lewej: HASL, ENIG, ImSn)

Na potrzeby prowadzonych badań wyprodukowano 240 płytek obwodów drukowanych, po 80 sztuk w przypadku każdej z trzech zastosowanych powłok (ENIG, HASL, ImSn).

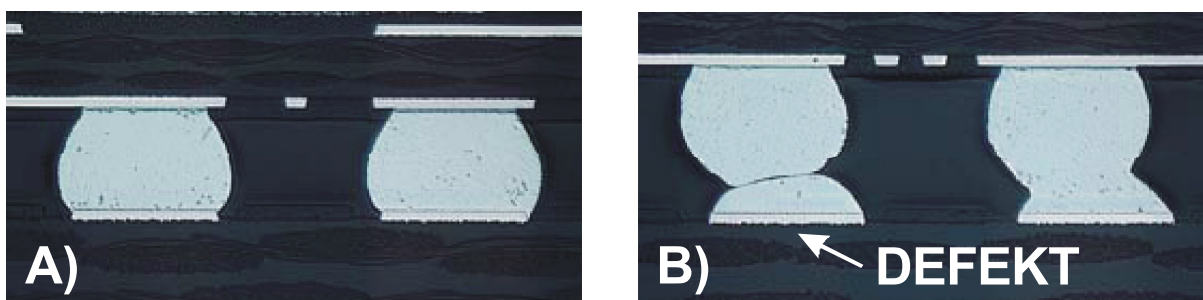
4.1.4 Wybrane stopy lutownicze

Do testów wybrano następujące pasty lutownicze:

1. Pastę ASNBIN-NC-31 firmy AMTECH zawierającą stop Bi_{42}Sn [63]. Pastę wybrano do badań ze względu na jej powszechne zastosowanie w montażu elementów

nieodpornych na działanie wysokiej temperatury (np. 230°C). Domieszka bizmutu zapewnia obniżenie temperatury topnienia do 138°C (stop jest eutektyką). W dalszej części pracy pasta będzie określana jako pasta lub stop niskotemperaturowy.

2. Pastę SN100C-XF3 firmy COBAR zawierającą stop SnCuNi [64]. Pastę wybrano do badań ze względu na opinię producenta, według której złącza wykonane przy jej użyciu cechuje zwiększona wytrzymałość zmęczeniowa. Pasta zawiera domieszkę niklu i germanu. W dalszej części pasta będzie określana jako pasta lub stop SN100C.
3. Pastę SS48-M955 firmy KOKI zawierającą stop eutektyczny Sn36Pb2Ag [65]. Pastę zawierającą ołów wybrano jako referencyjną, umożliwiającą ocenę porównawczą badanych bezołowiowych past lutowniczych. Dalej pasta będzie określana jako pasta lub stop ołowiowy.
4. Pastę S3X48-M406-3 firmy KOKI zawierającą stop Sn3Ag0,5Cu [65]. Pastę wybrano do badań ze względu na jej powszechne zastosowanie w przemyśle. Według dokumentacji dostarczanej przez producenta skład pasty zapobiega powstawaniu defektu złącza zwanego „hidden pillow defect” (rysunek 4.7), polegającego na powstaniu nieciągłego złącza.



Rysunek 4.7: A) prawidłowe złącza, B) defekt "hidden pillow" (dokumentacja techniczna, KOKI)

Ten problem techniczny dotyczy zarówno wyprowadzeń sferycznych (flip-chip, BGA), jak również wyprowadzeń typu „J” (ang. J-lead), typu „L” (ang. gull wing) oraz kontaktów bezwyprowadzeniowych (metalizowanych). W dalszej części pracy pasta będzie określana jako pasta lub stop SAC A.

5. Pastę SAC3-XF3 firmy COBAR zawierającą stop Sn3Ag0,5Cu [64]. Pastę wybrano do badań w celu porównania z pastą S3X48-M406-3, zawierającą stop lutowniczy o tym samym składzie, ale dostarczanej przez innego producenta. W dalszej części rozprawy pasta będzie określana jako pasta lub stop SAC B.

Przy stosowaniu past SAC A, SAC B, SN100C oraz ołowiowej procesy lutowania prowadzone były w atmosferze azotu. W przypadku pasty niskotemperaturowej połowa płytek została poddana procesowi lutowania w atmosferze azotu, a połowa w powietrzu. Prowadzenie procesu lutowania w atmosferze ochronnej (np. atmosferze azotu) ma na celu zminimalizowanie utleniania wtórnego powierzchni stopu lutowniczego, wyprowadzeń elementów, pól lutowniczych, topnika oraz laminatu. Dodatkowo atmosfera ochronna azotu skutecznie wspomaga działanie topników nowej generacji, które nie wymagają czyszczenia płytek po procesie lutowania (tzw. topniki „no clean”).

W badaniach prowadzonych w pracy analizowano wpływ stopów lutowniczych na właściwości złączy lutowanych przyjmując, że pasty lutownicze zawierają topniki rekomendowane przez producentów i zastosowanie innych topników prowadziłyby do pogorszenia cech złączy.

4.2 Program badań

Do badań przygotowano łącznie 240 płytek obwodów drukowanych zawierających łącznie 4800 sztuk zwór SMD 1206 oraz 4800 sztuk zwór SMD 0805.

Przygotowano:

- po 48 płytek z wykorzystaniem pasty niskotemperaturowej (lutowanie w atmosferze powietrza), SAC A, SAC B, oraz SN100C,
- po 24 płytki stosując pastę niskotemperaturową (lutowanie w atmosferze azotu) oraz ołowiową.

Po procesie montażu uzyskano 18 konfiguracji płytek testowych różniących się użytymi powłokami i pastami (tabela 4.2). Przed przystąpieniem do badań na powierzchnię płytek naniesiono oznaczenia oraz numerację.

L.p.	Skład stopu lutowniczego	Producent pasty i jej nazwa handlowa	Zastosowana powłoka pola lutowniczego	Atmosfera procesu lutowania
1	Sn42Bi58	AMTECH ASNBIN NC-31	Cyna chemiczna	Powietrze
2	Sn42Bi58	AMTECH ASNBIN NC-31	Au/Ni ENIG	Powietrze
3	Sn42Bi58	AMTECH ASNBIN NC-31	Stop bezołowiowy HASL	Powietrze
4	Sn42Bi58	AMTECH ASNBIN NC-31	Cyna chemiczna	Azot
5	Sn42Bi58	AMTECH ASNBIN NC-31	Au/Ni ENIG	Azot
6	Sn42Bi58	AMTECH ASNBIN NC-31	Stop bezołowiowy HASL	Azot
7	Sn62Pb36Ag2.0	KOKI SS48-M955	Cyna chemiczna	Azot
8	Sn62Pb36Ag2.0	KOKI SS48-M955	Au/Ni ENIG	Azot
9	Sn62Pb36Ag2.0	KOKI SS48-M955	Stop bezołowiowy HASL	Azot
10	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	COBAR S3X70	Cyna chemiczna	Azot
11	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	COBAR S3X70	Au/Ni ENIG	Azot
12	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	COBAR S3X70	Stop bezołowiowy HASL	Azot
13	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	KOKI S3X48-M406-3	Cyna chemiczna	Azot
14	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	KOKI S3X48-M406-3	Au/Ni ENIG	Azot
15	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	KOKI S3X48-M406-3	Stop bezołowiowy HASL	Azot
16	SnCu0.7Ni	COBAR SN100C-XF3	Cyna chemiczna	Azot
17	SnCu0.7Ni	COBAR SN100C-XF3	Au/Ni ENIG	Azot
18	SnCu0.7Ni	COBAR SN100C-XF3	Stop bezołowiowy HASL	Azot

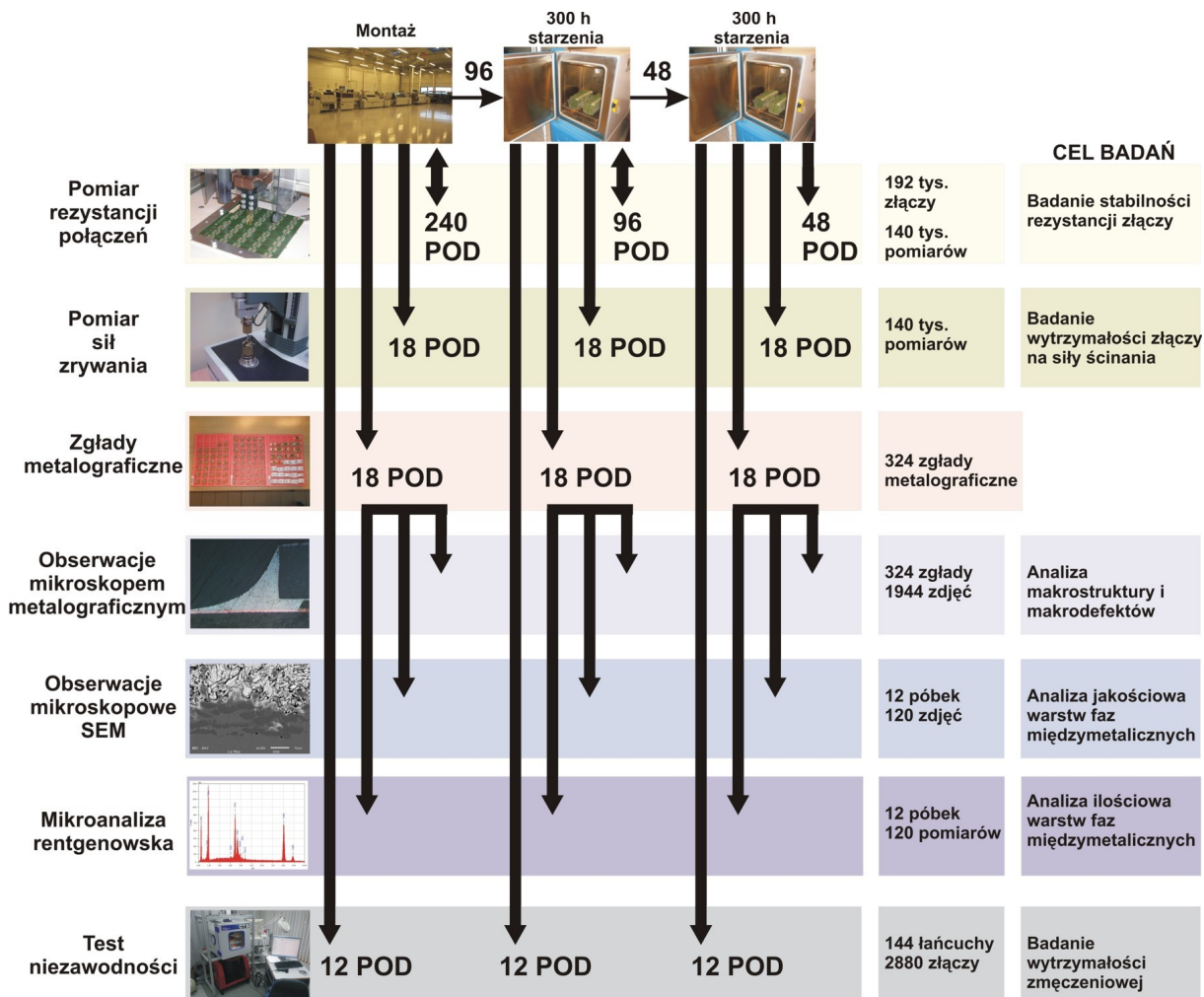
Tabela 4.2: Konfiguracje płytek testowych uzyskane po procesie montażu

Zgodnie z celami pracy, płytki testowe przygotowano do badań mających na celu określenie wpływu mikrostruktury złączy lutowanych, w szczególności obecności faz międzymetalicznych, na ich wytrzymałość zmęczeniową oraz rezystancję elektryczną. Wykazanie słuszności podanych we wstępie tez wymaga przeprowadzenia procedur badawczych obejmujących:

- analizę makrostruktury złączy lutowanych w oparciu o obserwacje przeprowadzone mikroskopem metalograficznym,
- analizę mikrostruktury złączy lutowanych w oparciu o obserwacje przeprowadzone skaningowym mikroskopem elektronowym oraz wyniki mikroanalizy rentgenowskiej,

- badanie długoterminowej stabilności rezystancji złączy lutowanych,
- badanie wytrzymałości złączy lutowanych na działanie sił ścinających,
- przyspieszone testy niezawodności złączy lutowanych.

Kolejne etapy procedury badawczej przedstawiono schematycznie na rysunku 4.8.



Rysunek 4.8: Kolejne etapy procedury badawczej

4.3 Proces starzenia płytek testowych

Jak widać ze schematu procedur badawczych (rysunek 4.8) standardowym procesem jest wygrzewanie testowanych złączy. Ma to na celu intensyfikację szybkości wzrostu faz międzymetalicznych w obszarze badanych złączy, trudnych do obserwowania przy przechowywaniu elementów elektronicznych w temperaturze normalnej. Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 3.4 kilkugodzinne wygrzewanie złączy w podwyższonych temperaturach odpowiada kilkuletniemu ich składowaniu. Z tego względu proces jest nazywany starzeniem i jest powszechnie stosowany przez jednostki badawcze [42], [66], [67],

[51].

Spośród posiadanych 240 testowych płytek obwodów drukowanych wybrano 96 płytek, które poddano procesowi wygrzewania w komorze klimatycznej Challenge 250 firmy Angeloantoni Industrie (rysunek 4.9). Proces wygrzewania przeprowadzono w stałej temperaturze, równej 90°C w przypadku złączy lutowanych wykonanych przy wykorzystaniu niskotemperaturowej pasty (z dodatkiem bizmutu) lub w temperaturze 150°C w przypadku pozostałych past lutowniczych. Przyjmuje się bowiem, że maksymalna temperatura złączy lutowanych w warunkach długotrwałych narażeń powinna być niższa od temperatury topnienia stopu lutowniczego o co najmniej 50°C. Proces wygrzewania trwał 300 godzin.



Rysunek 4.9: Testowe płytki obwodów drukowanych przed procesem starzenia w komorze klimatycznej

Zgodnie ze schematem procedur badawczych przedstawionym na rysunku 4.8, 48 płytek poddano badaniom bezpośrednio po procesie starzenia, natomiast w przypadku pozostałych 48 płytek badania zostały przeprowadzone po poddaniu ich ponownemu procesowi starzenia (300 godzin w temperaturze odpowiednio 90 lub 150°C).

5 Mikrostruktura złączy

5.1 Zgłady złączy lutowanych

W celu przeprowadzenia oceny struktury złączy wykonano zgłady metalograficzne (w dalszej części rozprawy będą nazywane w skrócie zgładami) złączy lutowanych, losowo wybranych z grup płytek reprezentujących badane konfiguracje materiałowe. Każdorazowo cięcie dokonano wzdłuż dłuższej osi zwory tak, aby ujawnić obydwie złącza (jak schematycznie to przedstawiono na rysunku 5.1). Inwazyjna operacja cięcia nie powinna spowodować pęknięcia złącza wskutek narażeń mechanicznych. Dlatego też każdorazowo granica cięcia próbki przebiegała w odległości nie bliższej niż 3 mm od przewidywanej powierzchni zgładu.

Proces przygotowania zgładów do obserwacji w mikroskopie optycznym wymagał wykonania następujących operacji:

- wycięcia badanej struktury zawierającej zworę, obydwie złącza lutowane i fragment płytki obwodu drukowanego,
- umieszczenia struktury w naczyniu (zwykle cylindrycznym, niezwilżalnym przez żywicę epoksydową) i zalania żywicą Epidian 5,

- (po polimeryzacji żywicy) usuwania fragmentu struktury przez szlifowanie i polerowanie, aż do ujawnienia interesujących fragmentów złącza.

Końcowym etapem było selektywne trawienie. Badaną strukturę w różnych fragmentach procesu przygotowania zglądu pokazano na rysunku 5.1.



Rysunek 5.1: Zwora SMD 1206 przylutowana do powierzchni płytki testowej, badane struktury zatopione w żywicy epoksydowej i zglądy po procesie szlifowania

Obserwacje prowadzone w elektronowym mikroskopie skaningowym wymagały dodatkowej preparacji próbek. Przygotowane do obserwacji w mikroskopie optycznym zglądy zostały dodatkowo poddane:

- szlifowaniu wodoodpornym papierem ściernym o gradacji co najmniej 800,
- polerowaniu wstępnemu pastą polerską zawierającą tlenek ceru,
- dokładnemu polerowaniu koloidalną zawiesiną krzemionki,
- trawieniu w roztworze wodnym kwasów (2% HCl, 6% HNO₃ i 92% wody) przez 30 sekund,
- pokryciu przewodzącą warstwą węgla przez naporowanie w napyłarce próżniowej, w celu zapobieżenia ładowania się powierzchni próbki podczas bombardowania wiązką elektronową w mikroskopie skaningowym.

W przypadku każdej z 18 badanych konfiguracji materiałowych wykonano po 3 zglądy zwór 1206 oraz po 3 zglądy zwór 0805. Procedurę przeprowadzono po procesie montażu, po 300 oraz po 600 godzinach wygrzewania. Na potrzeby prowadzonych badań wykonano łącznie 324 zglądy metalograficzne.

5.2 Makroskopowe defekty złączy

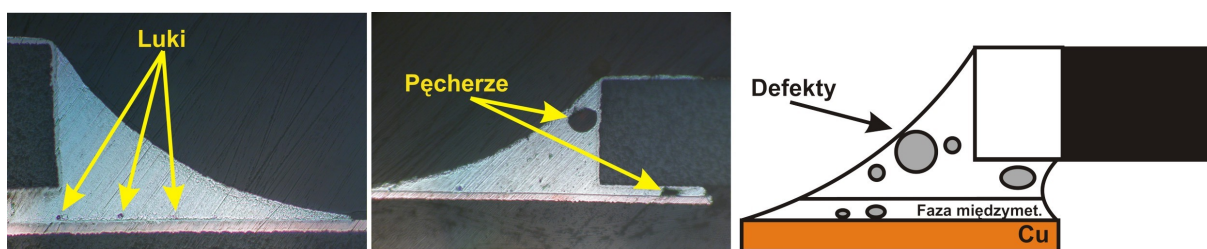
Podjęto próbę oceny wpływu parametrów materiałowych i czasu starzenia na defekty złączy ujawnione w obserwacjach mikroskopowych zglądów metalograficznych [68]. W tym

celu posłużono się metoda planowania eksperymentu i analizą wariacyjną otrzymanych wyników [69]. Złącza poddano ocenie zgodności z zaleceniami zawartymi w normie IPC-A610D [70].

Wytypowano trzy czynniki eksperymentu, każdy o trzech poziomach, a mianowicie

- stop lutowniczy (oznaczony jako czynnik A), o poziomach:
 - ołowiowy - Sn36Pb2Ag (oznaczony jako A1),
 - bezołowiowy SAC A - Sn3Ag0,5Cu (A2),
 - bezołowiowy o zwiększonej wytrzymałości zmęczeniowej SN100C - SnCuNi (A3),
- powłoka ochronna (czynnik B):
 - ImSn(B1),
 - ENIG (B2),
 - HASL (B3),
- czas starzenia (czynnik C):
 - bezpośrednio po montażu (C1),
 - po 300 godzinach starzenia w temperaturze 150°C (C2),
 - po 600 godzinach starzenia w temperaturze 150°C (C3).

Dla przeprowadzenia eksperymentu wybrano tabelę ortogonalną L27, przy czym w każdym teście, na podstawie wykonanych zdjęć w mikroskopie optycznym, oceniano 3 zglądy (6 złączy). Oznacza to, że ocenie jakości poddano łącznie 162 złącza (81 próbek). Przykłady najczęściej obserwowanych defektów struktury badanych złączy lutowanych przedstawiono na rysunku 5.2.



Rysunek 5.2: Przykłady najczęściej obserwowanych defektów struktury badanych złączy lutowanych

Metody planowania eksperymentu wymagają jednoznacznej miary wyniku eksperymentu, co jest trudne w przypadku zróżnicowania defektów, ich wielkości, usytuowania w złączu i stopnia degradacji podstawowych funkcji złącza. Dlatego posłużono się metodą subiektywnego przyporządkowania obserwowanym wadom wartości liczbowych.

Defekt	Waga [W _n]
1. Pęcherze pod elementem SMD	4
2. Pęcherze w innych miejscach lutu	3
3. Luki w lucie	2
4. Niejednorodna warstwa fazy międzymetalicznej	1
5. Pęknięcia	Nie zaobserwowano
6. Brak zwilżenia lutowanych powierzchni	Nie zaobserwowano

Tabela 5.1: Defekty stanowiące kryterium oceny jakości struktury złączy lutowanych

Poszczególnym defektom przypisano wagi określające istotność tych wad (tabela 5.1) i przyjęto sumaryczny parametr *USZKODZENIE* wyrażony zależnością:

$$USZKODZENIE = a_1 \times W_1 + a_2 \times W_2 + a_3 \times W_3 + a_4 \times W_4, \quad (5.1)$$

w którym:

- W_n - waga n-tego defektu,
- $a_n = 1$, gdy zaobserwowano defekt,
- $a_n = 0$, gdy nie zaobserwowano defektu.

Określając wagę defektu uwzględniono stopień wiarygodności obserwacji. Wartość wagi jest tym wyższa, im większa jest skala występowania defektu. Im większa jest skala występowania defektu, tym mniejsze jest prawdopodobieństwo, że wykonując zgład przeoczy się defekt.

Wyniki analizy wariancji (ANOVA) zebrano w tabeli 5.2. Sumy kwadratów czynników i interakcji nieistotnych dodano do puli błęd e_{pooled} . Jak widać, nie zauważono istotnego wpływu żadnego z analizowanych czynników na występowanie defektów, łącznie definiowanych parametrem *USZKODZENIE*. Wniosek ten osłabia znaczny udział błęd, który wskazuje, że na defekty mogą wpływać inne, nieanalizowane w eksperymencie czynniki związane z procesem montażu i lutowania. Na przykład intensywność występowania pęcherzy związana jest bezpośrednio ze sposobem nanoszenia pasty oraz jej jakością a także parametrami procesu lutowania [71], [72], [73], [74]. Należy także zdawać sobie

sprawę, że badania polegające na ocenie jakości struktury złącza na podstawie obserwacji selektywnych zglądów metalograficznych mogą być obarczone błędem nieujawnienia defektów istniejących w całej objętości złącza. Pomimo ujawnionych wad badane złącza spełniają zalecenia normy IPC-A610D.

	SS Suma kwadratów	v Stopnie swobody	V wariancja	F Współczynnik	SS' Wartość oczekiwana	P Udział procentowy
A	25	2	12	2,7*	16	3
B	20	2	10			
C	21	2	10			
AxB	58	4	14	3,2**	39	7
AxC	52	4	13	2,9**	34	6
BxC	24	4	6			
AxBxC	149	8	19	4,1***	112	19
e (błąd)	246	54	5		364	61
suma	594	80				100
e_{pooled}	335	64	43		392	69

Tabela 5.2: Tabela ANOVA; Wpływ czynników i ich interakcji na parametr USZKODZENIE (F-test: *** - 99% poziom ufności, ** - 95% poziom ufności, * - 90% poziom ufności)

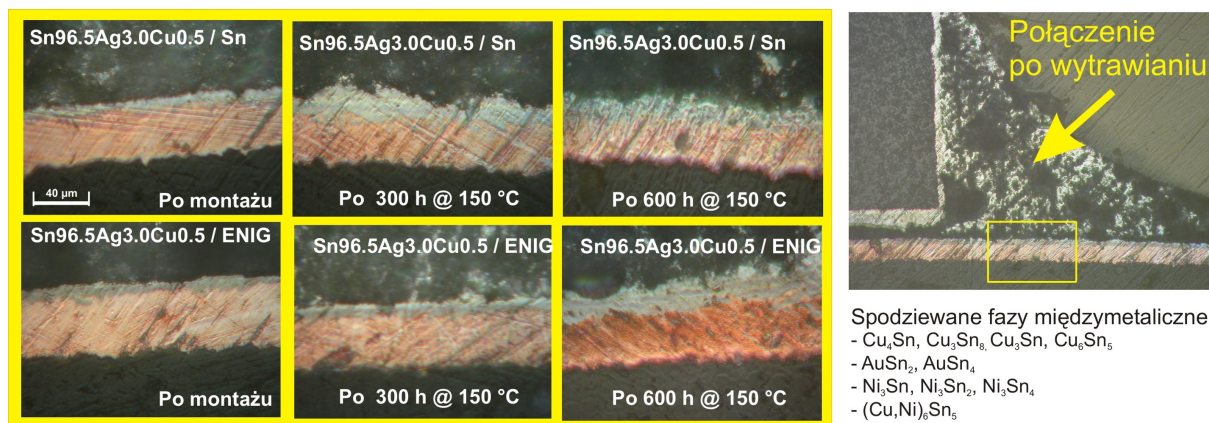
5.3 Wpływ procesu starzenia oraz użytych materiałów na fazy międzymetaliczne

Wobec braku zauważalnego wpływu procesu starzenia oraz użytych materiałów na makrodefekty złącza lutowanego (rozdział 5.2) przeprowadzono analizę mikrostruktury ukierunkowaną na ocenę jakościową oraz ilościową faz międzymetalicznych. Wstępne obserwacje prowadzono w optycznym mikroskopie metalograficznym. Natomiast dokładną analizę próbek przeprowadzono wykorzystując elektronowy mikroskop skaningowy.

Wstępnym obserwacjom mikroskopowym poddano 324 zglądy reprezentujące wszystkie badane konfiguracje materiałowe (według tabeli 4.2). Do dalszych badań metalograficznych wybrano złącza lutowane, wykonane stopem SAC A na powłokach ochronnych ImSn oraz ENIG. Wybrane konfiguracje materiałowe cechowała obecność wyraźnie widocznych warstw faz międzymetalicznych uformowanych na granicy stopu lutowniczego oraz pola lutowniczego. W celu wyodrębnienia warstw faz międzymetalicznych i przeprowadzenia pomiarów ich grubości, próbki poddano płytkiemu trawieniu stopu wodnym roztworem chlorku żelaza FeCl₃.

Obserwacje w mikroskopie metalograficznym umożliwiły identyfikację obszarów występowania oraz oszacowanie grubości warstw faz międzymetalicznych. Co więcej, dla

obu konfiguracji materiałowych zaobserwowano wzrost grubości warstw faz międzymetalicznych wywołany procesem starzenia (rysunek 5.3).



Rysunek 5.3: Zmiana grubości warstw faz międzymetalicznych wskutek starzenia

Dokładniejsze analizy faz międzymetalicznych i próby zidentyfikowania ich wzorów stechiometrycznych wymagały przeprowadzenia mikroanalizy rentgenowskiej z użyciem spektrometru promieniowania rentgenowskiego EDS (ang. Energy Dispersive Spectrometer). Takie badania prowadzono za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego JSM6610A firmy JEOL. Spektrometr, stanowiący wyposażenie tego mikroskopu, jest wyposażony w ultracienkie okienko i umożliwia analizę pierwiastków od boru do uranu. Do analiz ilościowych stosowano dostarczony z aparaturą program ZAF (Z – liczba atomowa, A – absorpcja, F – fluorescencja) bezwzorcowy (ang. standardless).

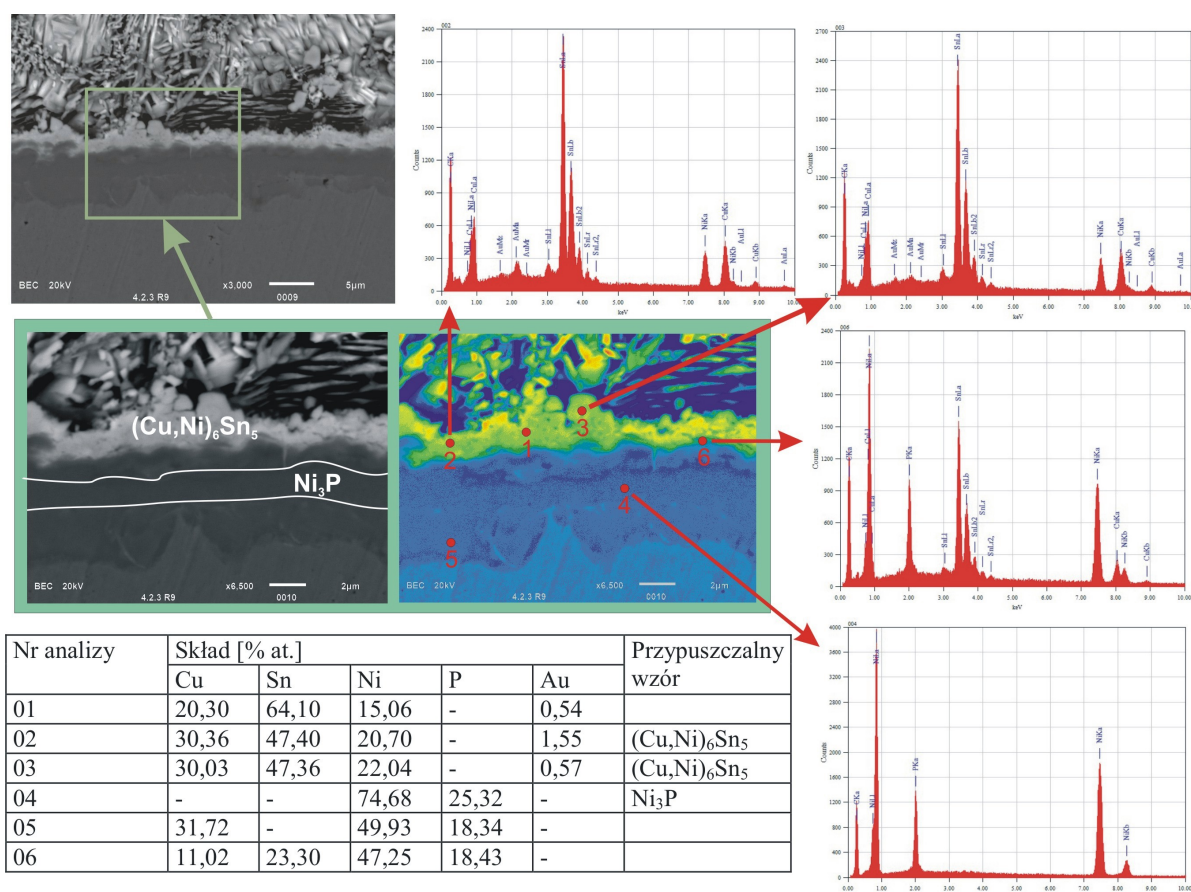
W celu uniknięcia rozmazania faz na fazach sąsiednich, wynikającego z procesu polerowania, próbki poddano podtrawieniu. Aby wyniki analizy były dokładne, badana powierzchnia musi charakteryzować się dużą gładkością i być równoległa do podstawy urządzenia. Średnica analizowanego obszaru powinna wynosić około 5 μm lub więcej. W próbkach poddanych analizie warstwy faz międzymetalicznych są bardzo cienkie, a powierzchnie próbek nie są równoległe do podstawy, co niestety skutkuje zwiększeniem błędów pomiarowych. Dodatkowe błędy wprowadzała zastosowana bezwzorcowa metoda obliczeniowa, a także przewodząca warstwa węgla pokrywająca próbki (w obliczeniach pominięto węgiel). Warstwa taka jest niezbędna do odprowadzenia ładunku elektrycznego wiązki elektronowej, bez względu na rezystancję analizowanej powierzchni.

Szczegółowym analizom poddano złącza lutowane stopem SAC B na powłokach ochronnych ENIG, ImSn, HASL oraz złącza lutowane stopem SN100C na powłoce ENIG. Kryterium wyboru konfiguracji materiałowej była wytrzymałość zmęczeniowa złączy, określona na podstawie przeprowadzonych testów niezawodności, podczas których złącza

poddawane były wibracjom oraz działaniu cyklicznie zmieniającej się temperatury (metodę i wyniki szczegółowo opisano w rozdziale 8.5). Stwierdzono bowiem, że złącza lutowane stopem SAC B na powłokach ochronnych ImSn oraz ENIG cechowały się najmniejszą wytrzymałością zmęczeniową spośród wszystkich badanych konfiguracji materiałowych. Z kolei złącza lutowane stopem SAC B na powłokach ochronnych HASL oraz złącza lutowane stopem SN100C na powłokach ochronnych ENIG charakteryzowała największa wytrzymałość zmęczeniowa spośród wszystkich złączy lutowanych stopami bezołowiowymi.

5.3.1 Złącza lutowane stopem SAC B na powłoce ochronnej ENIG

Wyniki obserwacji i mikroanalizy rentgenowskiej złącza lutowanego stopem SAC B na powłoce ochronnej ENIG, którego nie poddano procesom starzenia, przedstawiono na rysunku 5.4. Na granicy stopu i pola lutowniczego zaobserwowano dwie ciągłe, stosunkowo planarne warstwy faz. Przeprowadzona mikroanaliza rentgenowska umożliwiła określenie wzorów stechiometrycznych zaobserwowanych faz jako $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ oraz Ni_3P .



Rysunek 5.4: Lokalizacja oraz wzór stechiometryczny fazy międzymetalicznej oraz roztworu stałego w złączu lutowanym stopem SAC B na powłoce ochronnej ENIG

Jak wspomniano w rozdziale 2.2.4, powłoka ENIG to trójwarstwa – podłoże miedziane,

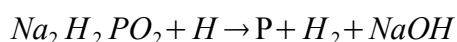
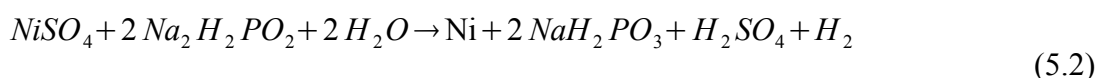
warstwa pośrednia Ni i zewnętrzna warstwa złota. Podczas lutowania cienka (0,07-0,12 μm) warstwa złota immersyjnego ulega rozpuszczeniu w ciekłym lucie ekspozując powierzchnię warstwy niklu na działanie płynnego lutu. Wskutek dyfuzji atomów między stopem a warstwą niklu uformowała się faza międzymetaliczna $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$. Wartość średnia grubości tej warstwy obliczona na podstawie pomiaru w 10 losowo wybranych miejscach wynosi $1,7 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$.

Warstwa niklu uniemożliwia lub w znacznym stopniu ogranicza dyfuzję miedzi, z której wykonana jest mozaika przewodząca płytki obwodu drukowanego, do:

- złota przed procesem lutowania,
- złącza podczas i po procesie lutowania.

Ponadto warstwa niklu bierze udział w formowaniu faz międzymetalicznych podczas procesu lutowania. W istocie, jak wynika z rysunku 5.4, w złączu pojawia się warstwa roztworu stałego fosforu w niklu (Ni_3P). Na podstawie 10 pomiarów w losowo wybranych lokalizacjach obliczono, że średnia wartość grubości tej warstwy wynosi $4,5 \mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$.

Faza Ni_3P uformowała się w warstwie niklu (4–6 μm) naniesionej metodą bezprądową w kąpeli niklowej na polach lutowniczych mozaiki miedzianej, przy czym obecność fosforu w warstwie niklu wynika z procesu chemicznego niklowania. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w normach PN-EN ISO 4527 [75] oraz ISO 4527:1987 [76], chemiczna powłoka niklowa osadzana jest głównie na drodze wymiany katalitycznej. Podstawowymi składnikami chemicznymi kąpeli niklowych są sole nikławe i reduktor, głównie podfosforyn sodowy. Podczas procesu chemicznego niklowania zachodzą następujące reakcje chemiczne:



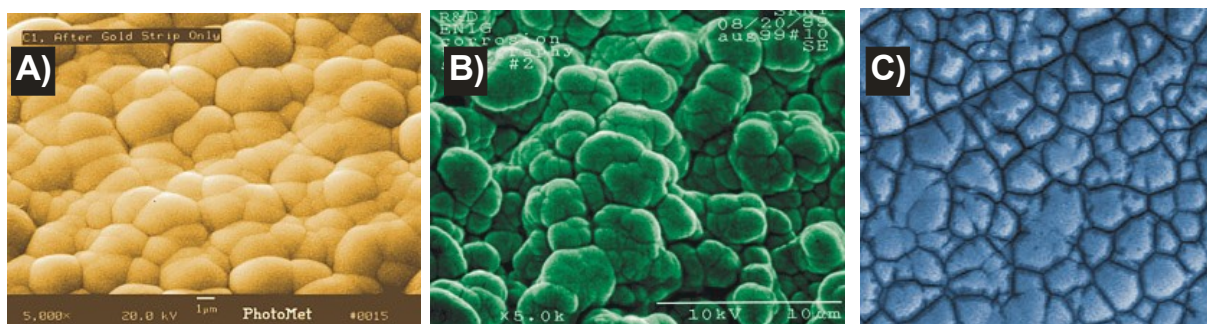
W pierwszej reakcji podfosforyn sodowy redukuje jon nikławy do niklu metalicznego, w drugiej reakcji zachodzi redukcja podfosforynu z wydzielaniem wolnego fosforu, który tworzy z niklem roztwór stały [77]. Podczas lutowania amorficzna warstwa Ni(P) ulega krystalizacji [78], [79]. Warstwa Ni(P) ma strukturę drobnokrystaliczną, gdy koncentracja fosforu nie przekracza 7% lub amorficzną w przeciwnym wypadku [80].

Obecność ciągłej, jednorodnej i stosunkowo grubej warstwy twardego i kruchej roztworu Ni_3P między miękką i sprężystą warstwą miedzi oraz miękkim i sprężystym stopem może istotnie zmniejszać wytrzymałość zmęczeniową złącza. Dodatkowo, jak wynika z doniesień

literaturowych [81], w złączach lutowanych stopami SnAgCu na powłokach ENIG, między warstwą $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ oraz Ni_3P może występować bardzo cienka ($< 200 \text{ nm}$) warstwa NiSnP zawierająca luki Kirkendalla, co zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową złączy. W badanych złączach luk Kirkendalla nie zaobserwowano.

Inną przyczyną zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej złączy lutowanych na powłokach ENIG może być niedostateczne zwilżenie pola lutowniczego podczas lutowania, spowodowane wadami powłoki ochronnej, co może wynikać z błędów technologicznych procesu nanoszenia powłoki. Częstą wadą są czarne obszary na polach lutowniczych, co w literaturze jest nazywane skrótowo „czarnym nikiem” lub „czarnymi padami” [5], [82].

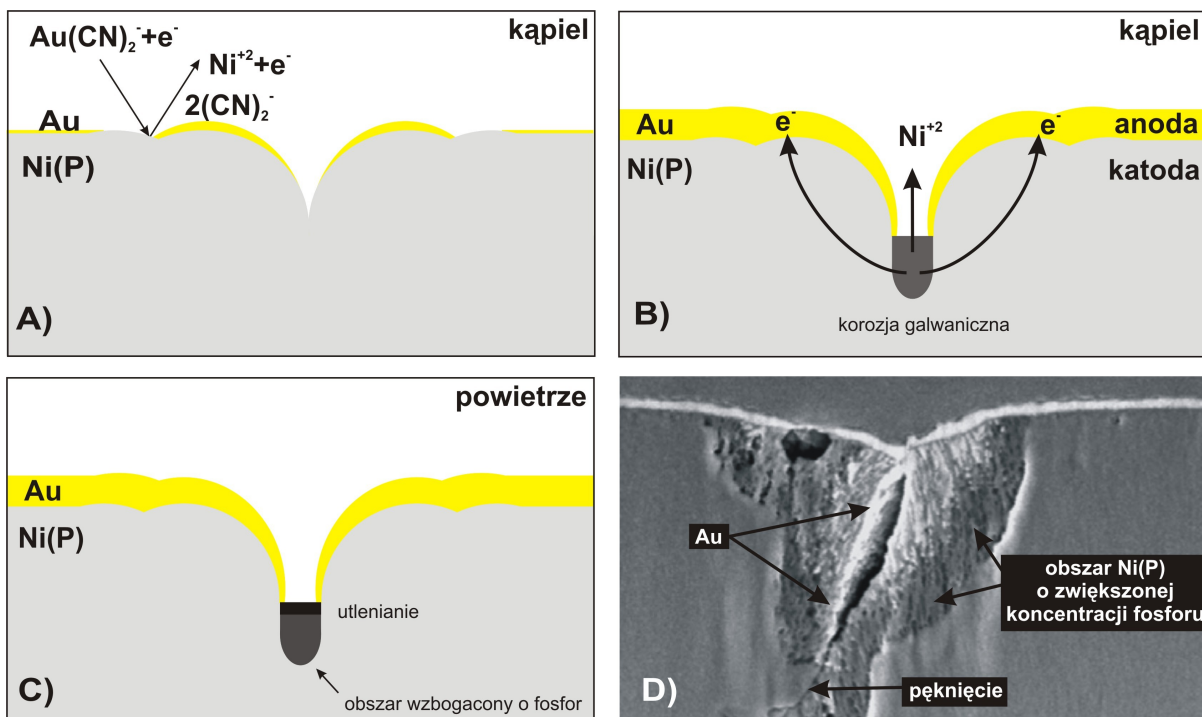
Cienka warstwa złota powłoki ENIG (Au/Ni(P)) zabezpiecza warstwę niklu przed utlenieniem i w konsekwencji utratą lutowności powłoki ochronnej. Mechanizmem nanoszenia immersyjnej warstwy złota na powierzchnię niklu jest wymiana jonów niklu jonami złota (korozja) podczas kąpieli chemicznej (rysunek 5.6A). Teoretycznie, w momencie pokrycia powierzchni warstwy niklu warstwą złota proces wymiany jonowej powinien ulec zatrzymaniu. W rzeczywistości jednak, ze względu na ziarnistą budowę oraz obecność szczelin w warstwie niklu (rysunek 5.5A oraz 5.5B), proces ulega jedynie znacznemu spowolnieniu. W przypadku niedostatecznej kontroli parametrów procesu, wewnątrz szczelin może dojść do nadmiernej korozji galwanicznej (rysunek 5.6B), co ostatecznie objawia się czarnymi przebarwieniami (rysunek 5.5C). Proces powstawania czarnego niklu pokazano schematycznie na rysunku 5.6.



Rysunek 5.5: Warstwy niklu naniesione metodą bezprądową: A) typowa warstwa o ziarnistej budowie, B) obecność szczelin w warstwie sprzyja nadmiernej korozji galwanicznej, C) warstwa z widocznymi bruzdami czarnego niklu [80]

Podczas kąpieli penetracja złota w głąb wąskich szczelin jest utrudniona, przez co koncentracja złota wewnątrz szczeliny różni się od koncentracji złota w kąpieli galwanicznej. Wskutek różnicy koncentracji złota tworzy się ogniwo galwaniczne, co prowadzi do korozji galwanicznej warstwy niklu wewnątrz szczeliny (rysunek 5.6B) [80], [81]. Wskutek korozji

galwanicznej obszary wewnątrz szczelin cechuje większa koncentracja fosforu w porównaniu do pozostałych obszarów warstwy Ni(P). Ponadto niepokryte złotem powierzchnie poddawane działaniu atmosfery ulegają utlenieniu (rysunek 5.6C). Warstwa Ni(P) bogatsza w fosfor ma czarny kolor. Warstwa taka może również powstać podczas procesu nakładania niklu.



Rysunek 5.6: Mechanizm powstawania „czarnego niklu”: A) korozja w kąpieli chemicznej, B) korozja galwaniczna w kąpieli chemicznej, C) korozja oraz utlenianie w powietrzu, D) pęknięcie w skorodowanej szczelinie [81]

Obecność „czarnego niklu” stwierdza się na podstawie inspekcji wizualnej powierzchni pękniętego złącza lub powierzchni pola lutowniczego po uprzednim oderwaniu od niego przylutowanego elementu.

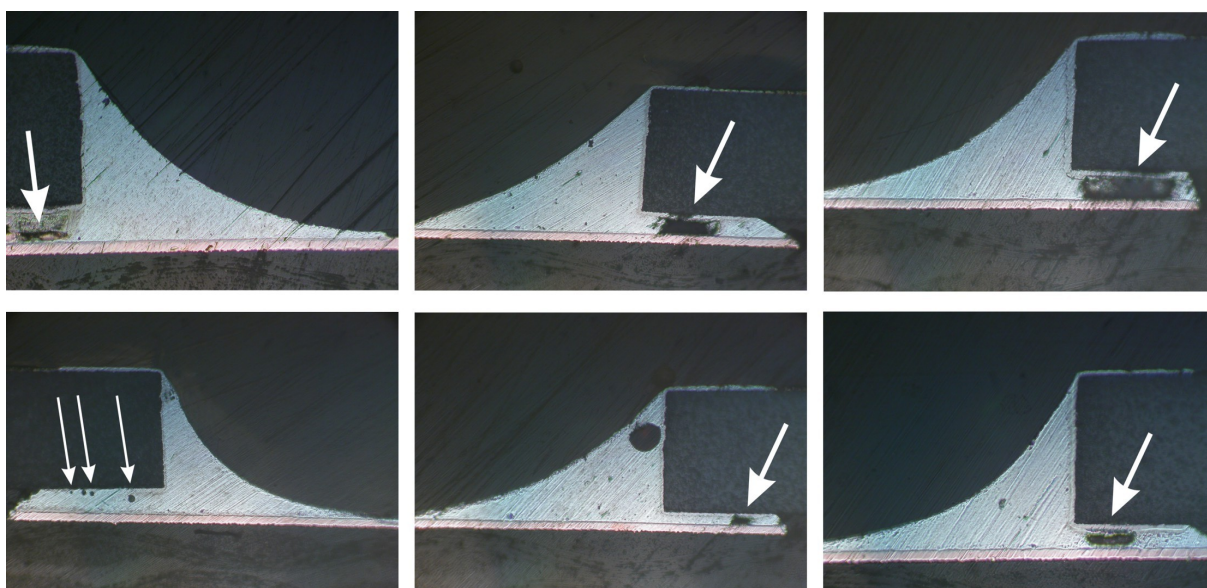
Obecność obszarów „czarnego niklu” w istotnym stopniu pogarsza lutowność powłoki. Podczas procesu lutowania obszary „czarnego niklu” nie są zwilżane przez płynny lut. W konsekwencji powstają wadliwe złącza o charakterze adhezyjnym (powstałe bez udziału dyfuzji atomów), o znacznie zmniejszonej wytrzymałości zmęczeniowej.

W celu uniknięcia występowania „czarnego niklu” należy [83]:

- dostosować tempo nakładania warstwy niklu w celu utrzymania udziału procentowego fosforu w warstwie niklu w przedziale od 7 do 10%,
- na warstwy miedzi nanosić warstwy niklu o grubości większej niż 3 μm ,

- ściśle kontrolować proces kąpieli niklującej,
- zminimalizować odstęp czasu między nanoszeniem warstw niklu i złota (łącznie z płukaniem międzyoperacyjnym przerwa nie powinna być dłuższa niż 90 sekund).

Badania wykonanych złączy nie wykazały obecności obszarów występowania „czarnego niklu”, ani też nie stwierdzono braku zwilżania. Prowadzono zarówno mikroskopową obserwację powierzchni pól lutowniczych, od których oderwano przylutowane zwory jak i ocenę mikroskopową zglądów metalograficznych. Inspekcja zglądów ujawniła natomiast obecność pęcherzy w złączu (rysunek 5.7).



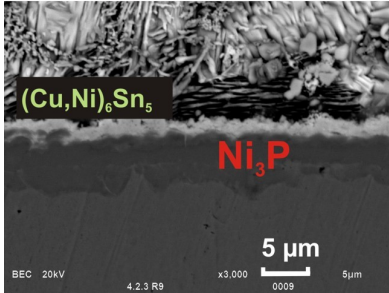
Rysunek 5.7: Pęcherze zaobserwowane w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce ENIG

Występowanie pęcherzy pod polami lutowniczymi elementu, gdzie złącze jest najcieńsze, może przyczyniać się do zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej połączenia.

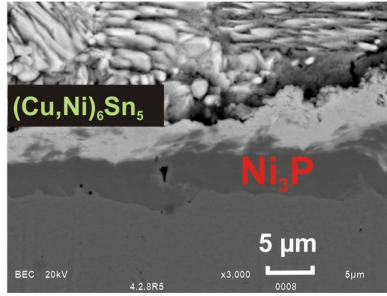
Wpływ procesu starzenia na skład oraz ukształtowanie faz międzymetalicznych oceniono na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej wyników badań mikroskopowych oraz mikroanalizy rentgenowskiej złączy po procesie montażu oraz złączy poddawanych starzeniu przez 300 oraz 600 godzin w temperaturze 150°C.

Warstwy faz międzymetalicznych złączy, których nie poddano starzeniu były ciągłe i miały regularną linię brzegową. W złączach, które poddano starzeniu, zaobserwowano (rysunek 5.8), że warstwy międzymetaliczne są grubsze, z nieregularnymi krawędziami i zawierają wtrącenia innych faz i metali.

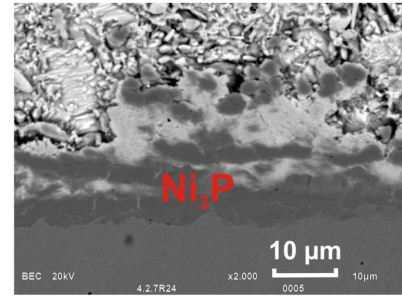
SAC B / ENIG
po montażu



SAC B / ENIG
po 300 h w temp. 150 °C



SAC B / ENIG
po 600 h w temp. 150 °C



Rysunek 5.8: Wpływ procesu starzenia na szerokość i kształt warstwy roztworu stałego oraz fazy międzymetalicznej w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce ENIG

Problem jest na tyle ważny, że dla każdego z badanych złączy przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską warstw w 15 lokalizacjach. Badania wykazały, iż w przypadku złączy poddawanych procesom starzenia można zidentyfikować fazy międzymetaliczne o składzie innymi niż w przypadku złączy niestarzonych. Rezultaty w postaci wzorów stechiometrycznych zebrano w tabeli 5.3.

	Fazy międzymetaliczne i roztwory stałe
Po montażu	$(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$, $(\text{Cu,Ni,Au})_6\text{Sn}_5$, Ni_3P
Po 300 h starzenia	$(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$, $(\text{Cu,Ni,Au})_6\text{Sn}_5$, $(\text{Ni,Cu})_3\text{P}$, Ni_3P
Po 600 h starzenia	$(\text{Ni,Cu})_3\text{P}$, Ni_3P

Tabela 5.3: Wzory stechiometryczne faz międzymetalicznych i roztworów stałych zidentyfikowanych w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce ENIG

Na podstawie pomiarów grubości warstw zidentyfikowanych faz, korzystając z równania (3.1) opisującego grubość warstwy fazy międzymetalicznej w funkcji czasu, wyliczono wartości współczynników dyfuzji fazy międzymetalicznej $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ oraz roztworu stałego Ni_3P . Wartości średnie z 10 pomiarów grubości warstw oraz wyliczone współczynniki dyfuzji zamieszczono w tabeli 5.4.

Faza / roztwór	Grubość warstwy po montażu [µm]	Grubość warstwy po 300 h starzenia [µm]	Grubość warstwy po 600 h starzenia [µm]	Współczynnik dyfuzji 150 °C [m ² /s]
$(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$	1,7 ±0,3	4,5 ±1	7,3 ±1,4	1,43·10 ⁻¹⁷
Ni_3P	4,5 ±0,8	4,7 ±0,8	11,3 ±1,5	2,17·10 ⁻¹⁷

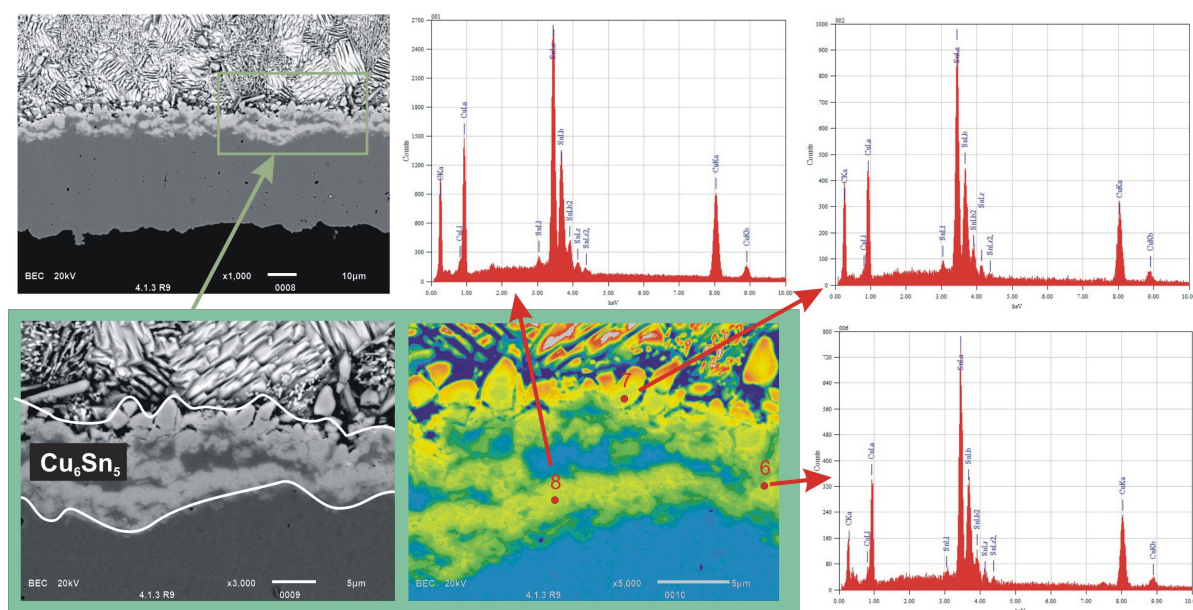
Tabela 5.4: Wartości średnie grubości warstw oraz współczynniki dyfuzji fazy międzymetalicznej i roztworu stałego w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce ENIG

Zaobserwowane zmiany ukształtowania faz międzymetalicznych, ich składu oraz grubości

spowodowane były procesami dyfuzji, które ulegają znacznemu przyspieszeniu w warunkach podwyższonej temperatury procesu starzenia. Obecność grubych warstw kruchych faz międzymetalicznych oraz roztworu stałego może przyczynić się do zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej oraz zmęczeniowej złączy lutowanych. Znaczna zmiana grubości zarówno warstwy fazy międzymetalicznej jak i roztworu stałego wskutek kolejnych procesów starzenia (tabela 5.4) wskazuje, że wytrzymałość złączy lutowanych stopem SAC B na powłoce ochronnej ENIG poddawanych procesom starzenia powinna być znacznie mniejsza niż wytrzymałość złączy niestarzonych.

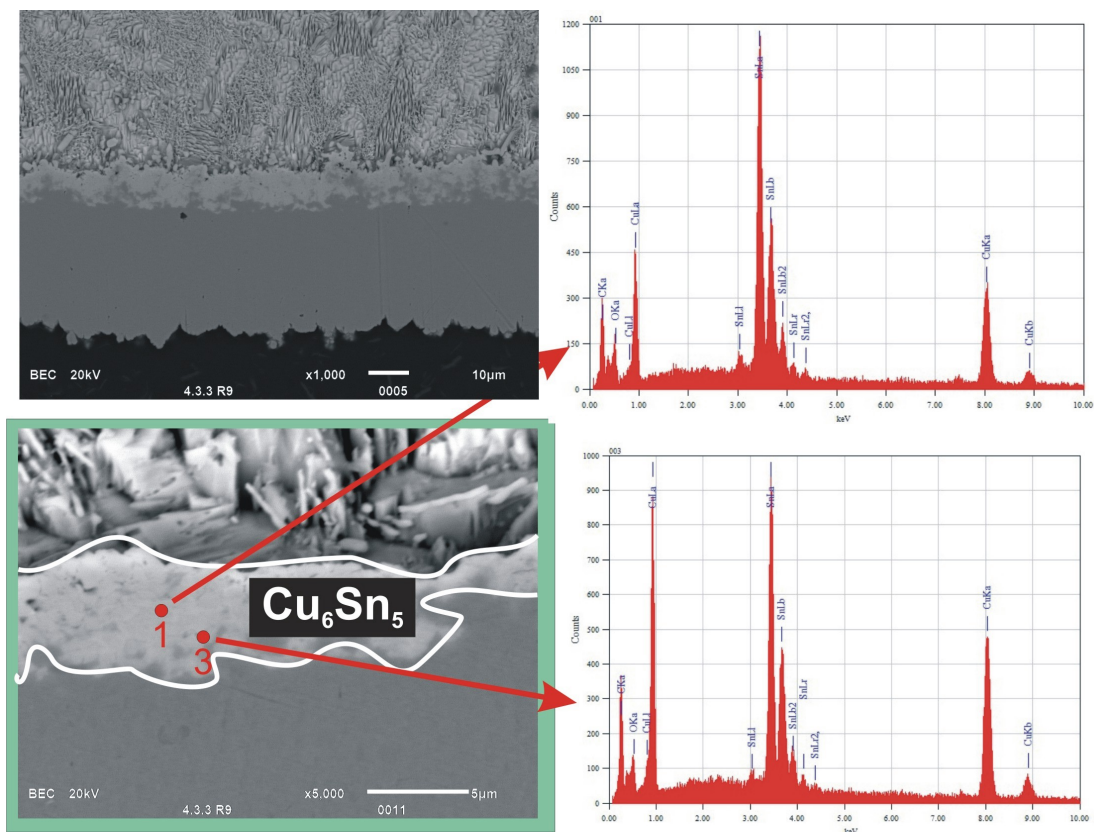
5.3.2 Złącza lutowane stopem SAC B na powłocie ImSn oraz HASL

Wyniki obserwacji i mikroanalizy rentgenowskiej złącza lutowanego stopem SAC B na powłoce ochronnej ImSn pokazano na rysunku 5.9 a na powłoce HASL na rysunku 5.10. Złącza nie były poddawane procesowi starzenia. Dla obydwu badanych powłok na granicy stopu i pola lutowniczego zaobserwowano warstwy o nieregularnym ukształtowaniu i rozbudowanych krawędziach. Przeprowadzona mikroanaliza rentgenowska wykazała, że ujawnione warstwy stanowiła faza międzymetaliczna Cu_6Sn_5 . W przypadku złącza lutowanego na powłocie ImSn warstwa cechowała się licznymi wtrąceniami miedzi.



Nr analizy	Skład [% at.]		Przypuszczalny wzór
	Cu	Sn	
06	52,96	47,04	Cu_6Sn_5
07	52,86	47,14	Cu_6Sn_5
08	54,42	45,58	Cu_6Sn_5

Rysunek 5.9: Lokalizacja oraz wzór stechiometryczny fazy międzymetalicznej w złączu lutowanym stopem SAC B na powłocie ochronnej ImSn



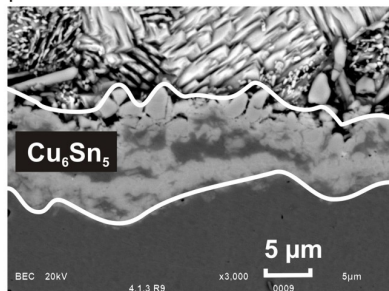
Nr analizy	Skład [% at.]		Przypuszczalny wzór
	Cu	Sn	
01	52,18	47,82	Cu ₆ Sn ₅

Rysunek 5.10: Lokalizacja oraz wzór stechiometryczny fazy międzymetalicznej w złączu lutowanym stopem SAC B na powłoce ochronnej HASL

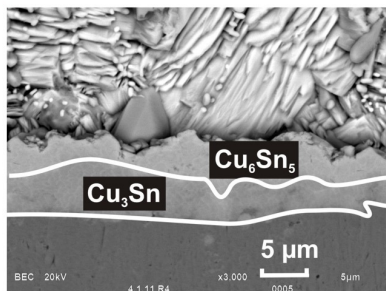
W kolejnym kroku badano wpływ starzenia na skład oraz kształt warstw faz międzymetalicznych. Dla każdego z badanych złączy przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską warstw w 15 lokalizacjach.

Mikroanaliza rentgenowska złączy na powłokach ImSn oraz HASL, które poddano starzeniu wykazała obecność dwóch faz – dotychczas obserwowanej fazy Cu₆Sn₅ oraz nowej fazy Cu₃Sn, przy czym fazę Cu₆Sn₅ obserwowano także w złączach bezpośrednio po procesie lutowania. Warstwy faz międzymetalicznych w złączach poddanych długotrwałemu starzeniu były ciągłe, pozbawione wtrąceń miedzi i miały regularną linię brzegową (rysunki 5.11 i 5.12).

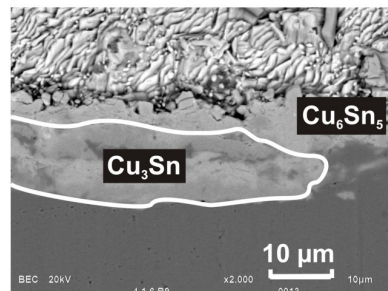
SAC B / ImSn
po montażu



SAC B / ImSn
po 300 h w temp. 150 °C

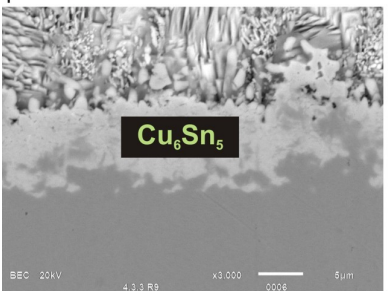


SAC B / ImSn
po 600 h w temp. 150 °C

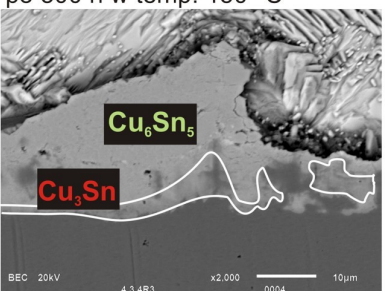


Rysunek 5.11: Wpływ procesu starzenia na warstwy faz międzymetalicznych w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce ImSn

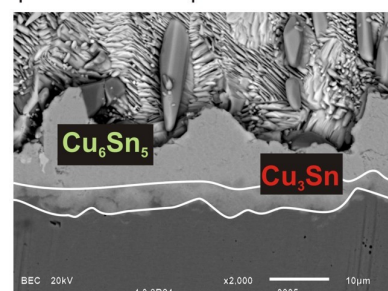
SAC3 B / HASL
po montażu



SAC3 B / HASL
po 300 h w temp. 150 °C



SAC3 B / HASL
po 600 h w temp. 150 °C



Rysunek 5.12: Wpływ procesu starzenia na warstwy faz międzymetalicznych w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce HASL

Ponadto analiza wykazała, że w złączach lutowanych stopem SAC B na powłokach HASL poddawanych procesom starzenia występują fazy międzymetaliczne o składzie innymi niż w złączach niepoddawanych procesom starzenia. Rezultaty w postaci wzorów stechiometrycznych zidentyfikowanych faz międzymetalicznych zebrano w tabeli 5.5.

	Faza międzymetaliczna
Po montażu	Cu_6Sn_5
Po 300 h starzenia	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Po 600 h starzenia	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Cu_4Sn (Cu,Ag) $_6\text{Sn}_5$

Tabela 5.5: Wzory stechiometryczne faz zidentyfikowanych w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce HASL

Na podstawie pomiarów grubości zaobserwowanych warstw faz międzymetalicznych, bazując na zależności grubości warstwy fazy międzymetalicznej od czasu (rozdział 3.3.1), wyliczono wartości współczynników dyfuzji fazy Cu_6Sn_5 oraz fazy Cu_3Sn dla złączy lutowanych stopem SAC B na powłokach ImSn oraz HASL. Wartości średnie z 10 pomiarów

grubości warstw faz międzymetalicznych oraz wyliczone współczynniki dyfuzji dla złączy lutowanych stopem SAC B na powłokach ImSn i HASL zamieszczono odpowiednio w tabelach 5.6 i 5.7.

Faza międzymetaliczna	Grubość warstwy po montażu [μm]	Grubość warstwy po 300 h starzenia [μm]	Grubość warstwy po 600 h starzenia [μm]	Współczynnik dyfuzji 150 °C [m^2/s]
Cu_6Sn_5	$3,0 \pm 0,8$	$3,8 \pm 0,6$	$6,5 \pm 1,5$	$5,51 \cdot 10^{-17}$
Cu_3Sn	0	$3,3 \pm 0,7$	$9,5 \pm 2,6$	$4,18 \cdot 10^{-17}$

Tabela 5.6: Wartości średnie grubości warstw faz międzymetalicznych oraz współczynniki dyfuzji faz zidentyfikowanych w złączach lutowanych stopem SAC B na powłokach ImSn

Faza międzymetaliczna	Grubość warstwy po montażu [μm]	Grubość warstwy po 300 h starzenia [μm]	Grubość warstwy po 600 h starzenia [μm]	Współczynnik dyfuzji 150 °C [m^2/s]
Cu_6Sn_5	$7,4 \pm 1$	$15,9 \pm 2,3$	$7,5 \pm 1,9$	$6,71 \cdot 10^{-17}$
Cu_3Sn	0	$3,8 \pm 1,7$	$4,0 \pm 0,6$	$1,37 \cdot 10^{-17}$

Tabela 5.7: Wartości średnie grubości warstw faz międzymetalicznych oraz współczynniki dyfuzji faz zidentyfikowanych w złączach lutowanych stopem SAC B na powłokach HASL

Różnice w wartościach współczynników dyfuzji dla tych samych faz mogą wynikać z zastosowania różnych powłok ochronnych. Ponadto obliczone wartości mogą być obarczone błędem wynikającym z analizy jedynie fragmentów złączy.

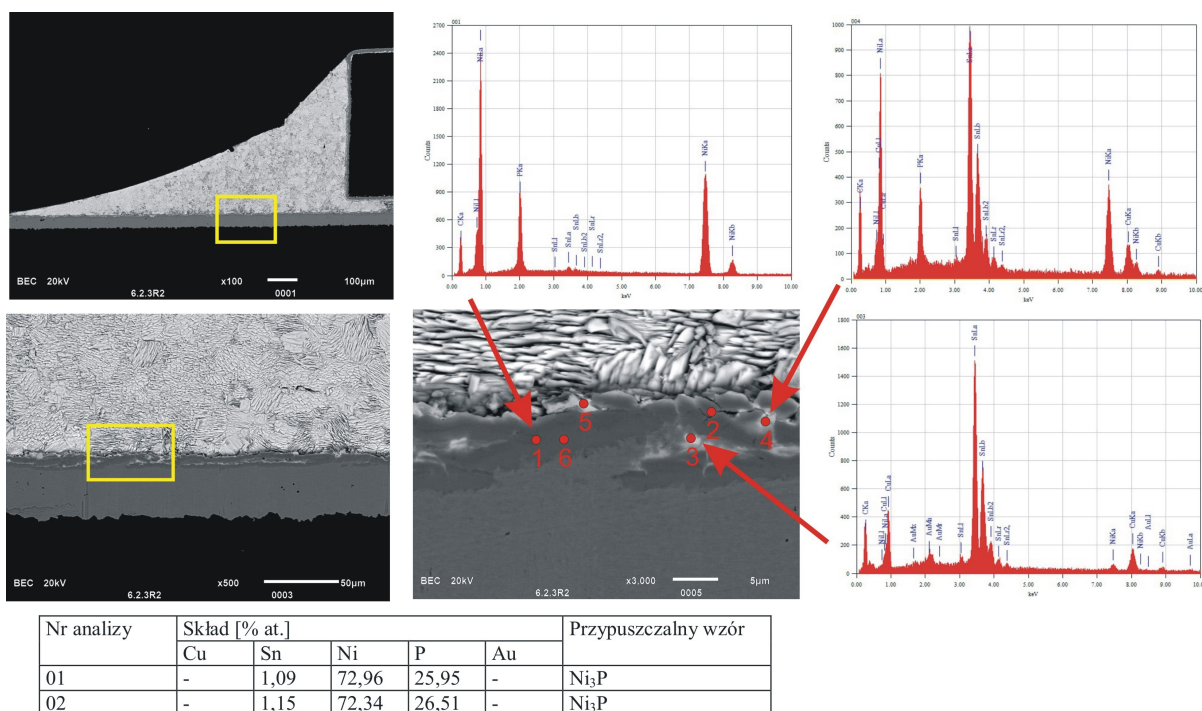
Obecność ciągłych jednorodnych i stosunkowo grubych warstw twardych i kruchych faz międzymetalicznych Cu_6Sn_5 oraz Cu_3Sn między miękką i sprężystą warstwą miedzi (mozaika przewodząca) oraz miękkim i sprężystym stopem może istotnie zmniejszać wytrzymałość zmęczeniową złączy. Zaobserwowane zmiany ukształtowania oraz grubości warstw faz międzymetalicznych spowodowane były procesami dyfuzji, które ulegają znacznemu przyspieszeniu w warunkach podwyższonej temperatury procesu starzenia.

5.3.3 Złącza lutowane stopem SN100C na powłoce ochronnej ENIG

Wyniki obserwacji i mikroanalizy rentgenowskiej złącza lutowanego stopem SN100C na powłoce ochronnej ENIG, którego nie poddano starzeniu pokazano na rysunku 5.13. Na granicy stopu i pola lutowniczego zaobserwowano nieciągłą warstwę o nieregularnym ukształtowaniu i rozbudowanych krawędziach. Przeprowadzona mikroanaliza rentgenowska

wykazała, że warstwę tę stanowił roztwór stały fosforu w niklu (Ni_3P).

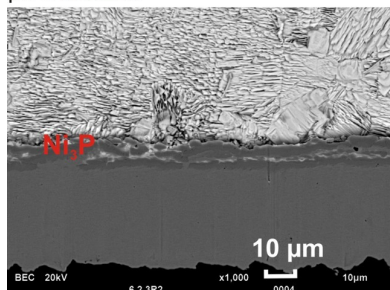
Podobnie jak dla poprzednio badanych kompozycji stopu lutowicznego i powłok ochronnych, wpływ procesu starzenia na skład oraz ukształtowanie warstw roztworu stałego oceniono na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej wyników badań mikroskopowych oraz mikroanalizy rentgenowskiej złączy po procesie montażu oraz złączy poddawanych starzeniu przez 300 oraz 600 godzin w temperaturze 150°C .



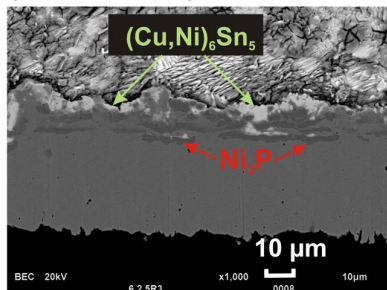
Rysunek 5.13: Lokalizacja oraz wzór stechiometryczny roztworu stałego w złączy lutowanym stopem SN100C na powłoce ochronnej ENIG

Dla każdego z badanych złączy przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską warstw w 15 lokalizacjach. Mikroanaliza rentgenowska złączy, które poddano procesowi starzenia wykazała obecność roztworu stałego Ni_3P i fazy międzymetalicznej $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}_4$. Dla złączy poddanych procesom starzenia zaobserwowano stopniowy zanik warstwy Ni_3P oraz rozrost fazy $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}_4$. Wpływ procesu starzenia na ukształtowanie warstw roztworu stałego oraz fazy międzymetalicznej w złączach lutowanych stopem SAC B na powłoce ENIG pokazano na rysunku 5.14.

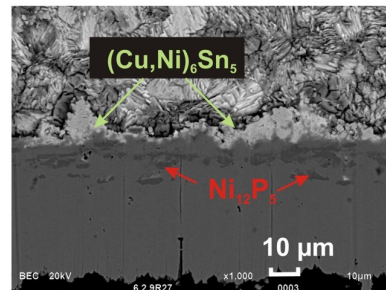
SN100C / ENIG
po montażu



SN100C / ENIG
po 300 h w temp. 150 °C



SN100C / ENIG
po 600 h w temp. 150 °C



Rysunek 5.14: Wpływ procesu starzenia na warstwy roztworu stałego oraz fazy międzymetalicznej w złączach lutowanych stopem SN100C na powłoce ENIG

W złączach, które poddano procesom starzenia zaobserwowano obecność dodatkowych faz międzymetalicznych i roztworów stałych o składzie innym niż w przypadku złączy niepoddawanych procesom starzenia. Rezultaty w postaci wzorów stechiometrycznych zebrano w tabeli 5.8.

	Fazy międzymetaliczne i roztwory stałe
Po montażu	Ni ₃ P
Po 300 h starzenia	Ni ₃ P, (Ni,Cu) ₃ Sn ₄ , Ni ₅ P ₂ , (Ni,Cu) ₅ P ₂ , (Ni,Cu,Au) ₃ Sn ₄
Po 600 h starzenia	Ni ₁₂ P ₅ , (Ni,Cu) ₃ Sn ₄ , (Ni,Cu) ₁₂ P ₅ , (Ni,Cu) ₃ P, (Ni,Cu) ₅ P ₂ , (Cu,Ni,Au) ₆ Sn ₅

Tabela 5.8: Wzory stechiometryczne faz międzymetalicznych i roztworów stałych zidentyfikowanych w złączach lutowanych stopem SN100C na powłoce ENIG

Na podstawie pomiarów grubości zaobserwowanych warstw roztworu stałego oraz fazy międzymetalicznej, korzystając z równania (3.1) opisującego grubość warstwy fazy międzymetalicznej w funkcji czasu, wyliczono wartości współczynników dyfuzji fazy (Cu,Ni)₆Sn₅ oraz roztworu Ni₃P. Wartości średnie z 10 pomiarów grubości warstw oraz wyliczone współczynniki dyfuzji zamieszczono w tabeli 5.9.

Faza / roztwór	Grubość warstwy po montażu [μm]	Grubość warstwy po 300 h starzenia [μm]	Grubość warstwy po 600 h starzenia [μm]	Współczynnik dyfuzji 150 °C [m ² /s]
(Cu,Ni) ₃ Sn ₄	0	3,7 ± 0,7	7,9 ± 1,8	2,93 · 10 ⁻¹⁷
Ni ₃ P	7,6 ± 1,3	4,2 ± 1,7	3,6 ± 0,9	1,04 · 10 ⁻¹⁷

Tabela 5.9: Wartości średnie grubości warstw oraz współczynniki dyfuzji fazy międzymetalicznej i roztworu stałego w złączach lutowanych stopem SN100C na powłoce ENIG

Zaobserwowane zmiany ukształtowania oraz grubości warstw spowodowane były

procesami dyfuzji, które ulegają znacznemu przyspieszeniu w warunkach podwyższonej temperatury procesu starzenia. Obecność nieciągłych niejednorodnych warstw roztworu stałego Ni_3P oraz fazy międzymetalicznej $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ nie powinna przyczyniać się do zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej złączy.

Przeprowadzone badania mikroskopowe umożliwiły identyfikację, pomiar grubości oraz określenie kształtu faz międzymetalicznych badanych złączy lutowanych. Badania wykazały, że mikrostruktura złącza lutowanego istotnie zależy od użytych stopów lutowniczych oraz powłok ochronnych pól lutowniczych. Wpływ grubości, różnorodności oraz kształtu faz międzymetalicznych na wytrzymałość mechaniczną oraz zmęczeniową badanych złączy został potwierdzony podczas przeprowadzonych pomiarów siły ścinania złączy (rozdział 7) oraz podczas przyspieszonych testów niezawodności złączy (rozdział 8).

6 Rezystancja złączy zawierających fazy międzymetaliczne

Prawidłowe połączenia lutowane powinny zapewniać kontakt elektryczny między elementem a mozaiką przewodzącą płytki obwodu drukowanego. O jakości kontaktu elektrycznego świadczy wartość jego rezystancji - w przypadku obwodów elektrycznych prądu stałego, lub impedancji w obwodach elektrycznych prądu zmiennego.

Rezystancja złącza lutowanego zależy głównie od:

- kształtu i wymiarów złącza,
- obecności makrodefektów struktury np. pęcherzy zlokalizowanych pod elementem, stopnia zwilżenia powierzchni lutowanych, pęknięć,
- rezystywności stopu lutowniczego, metalizacji wyprowadzenia oraz powłoki ochronnej,
- rezystywności faz międzymetalicznych oraz faz stałych formujących się w złączu,
- obecności defektów mikrostruktury, np. luk Kirkendalla, mikropęknięć.

W dobie intensywnego rozwoju techniki cyfrowej i mikroprocesorowej wartość rezystancji, a szczególnie jej stabilność w okresie użytkowania urządzeń elektrycznych

i elektronicznych odgrywa kluczową rolę. Układy cyfrowe, których poprawne działanie jest uzależnione od ściśle określonych poziomów sygnałów napięciowych są szczególnie wrażliwe na zmiany rezystancji połączeń. Niestabilność rezystancji połączeń lutowanych może prowadzić do błędnej pracy układu, której skutkiem może być uszkodzenie urządzenia. Zazwyczaj niestabilność ta objawia się systematycznym lub skokowym wzrostem wartości rezystancji.

Rezystancja złącza lutowanego może zwiększać się w sposób:

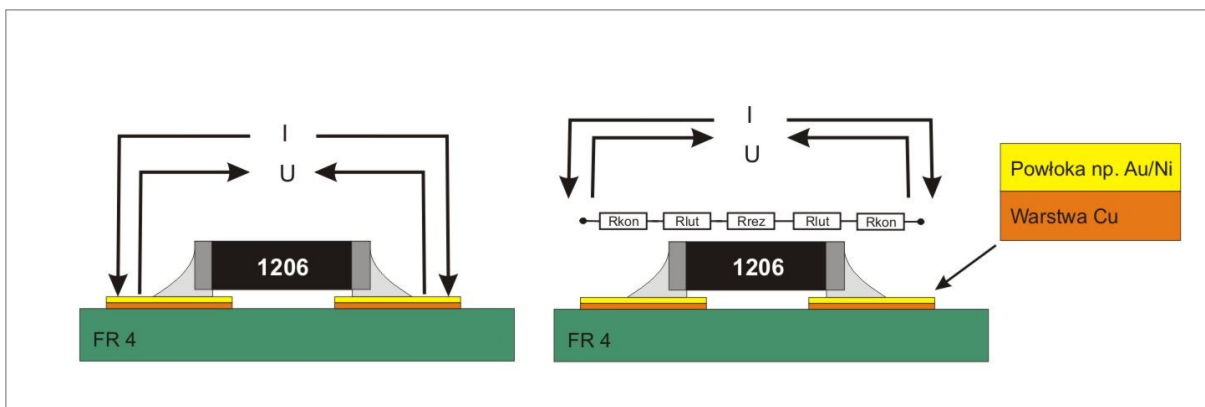
- Gwałtowny, wskutek pęknięcia jego struktury. Często obecność pęknięć skutkuje całkowitym zanikiem kontaktu elektrycznego (rozwarcie obwodu elektrycznego).
- Stopniowy, wskutek powolnej degradacji jego struktury. Powolna degradacja może być spowodowana procesami dyfuzji lub zmęczeniem złączy poddawanych cyklicznym obciążeniom np. zmianom temperatury lub wibracjom.

Stopniowa degradacja struktury złączy podczas użytkowania urządzeń jest procesem długotrwałym i może być przyspieszana wskutek starzenia. Jednak jak wykazały rezultaty dotychczas przeprowadzonych badań (rozdział 5), procesy starzenia mogą w sposób istotny wpływać jedynie na obecność i strukturę faz międzymetalicznych oraz występowanie mikrodefektów. Należy się zatem spodziewać, iż zmiany rezystancji wynikające z procesów starzenia będą stosunkowo niewielkie. Z uwagi na małą rezystancję złączy lutowanych (rezystancja pojedynczego złącza lutowanego elementu SMD 1206 wynosi od kilkunastu do kilkudziesięciu $\mu\Omega$), detekcja zmian rezystancji wynikających z obecności faz międzymetalicznych wymaga wyrafinowanych technik pomiarowych i oceny dużej liczby złączy.

6.1 System pomiarowy

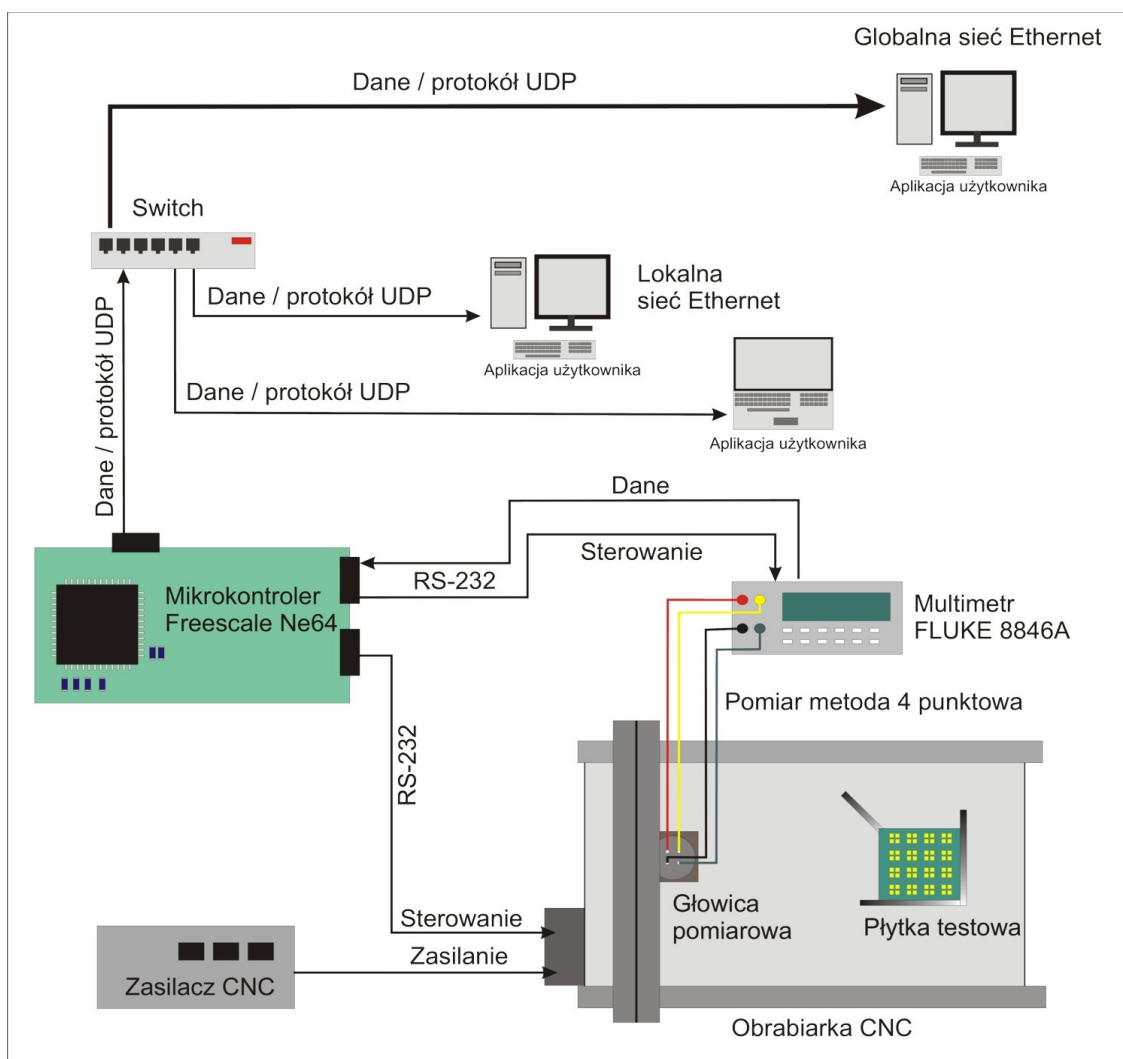
W celu zbadania stabilności rezystancji złączy lutowanych zawierających fazy międzymetaliczne użyto specjalnie do tego celu zaprojektowanego i wykonanego systemu pomiarowego, umożliwiającego pomiar niewielkich rezystancji oraz zapewniającego bardzo wysoką powtarzalność wielu pomiarów w automatycznych cyklach pomiarowych (precyzję pomiarów) [84]. Metodą czteropunktową (eliminując wpływ rezystancji sond na wynik pomiaru) mierzono rezystancję połączenia zwory z polami kontaktowymi płytki obwodu drukowanego (rysunek 6.1). Mierzona rezystancja stanowiła szeregowe połączenie rezystancji dwóch złączy i rezystancji zwory (w założeniu 0Ω). Testowe płytki obwodów drukowanych

(rozdział 4.1.2) zawierają pola kontaktowe umożliwiające dołączenie sond pomiarowych systemu.



Rysunek 6.1: Zasada pomiaru rezystancji połączenia lutowanego i schemat zastępczy mierzonej rezystancji

Schemat systemu pomiarowego pokazano na rysunku 6.2.



Rysunek 6.2: Schemat systemu pomiarowego umożliwiającego wykonanie automatycznych, wielokrotnych i powtarzalnych pomiarów rezystancji złączy

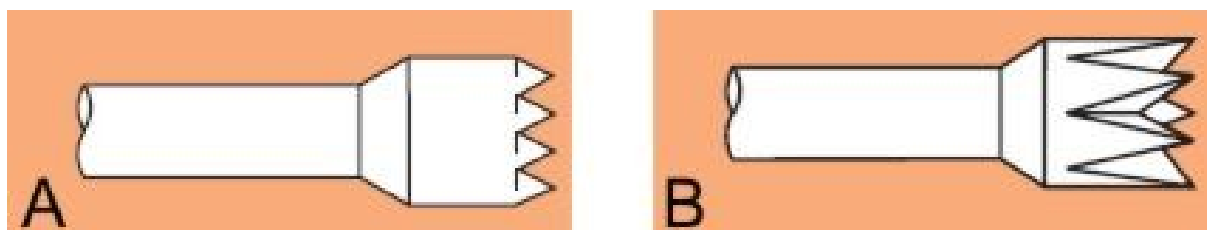
System składa się z następujących głównych podzespołów:

- precyzyjnego multimetru laboratoryjnego,
- komputerowo sterowanej maszyny CNC z głowicą pomiarową,
- mikrokontrolera,
- komputera z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem.

Rezystancję mierzono precyzyjnym multimetrem (model 8846A) laboratoryjnym wyprodukowanym przez firmę FLUKE [85]. Przed każdą serią pomiarów przeprowadzano proces kalibracji systemu pomiarowego za pomocą płytki testowej wybranej na początku badań. Na płycie kalibracyjnej zwory przylutowano stopem SAC B na powłokach ENIG.

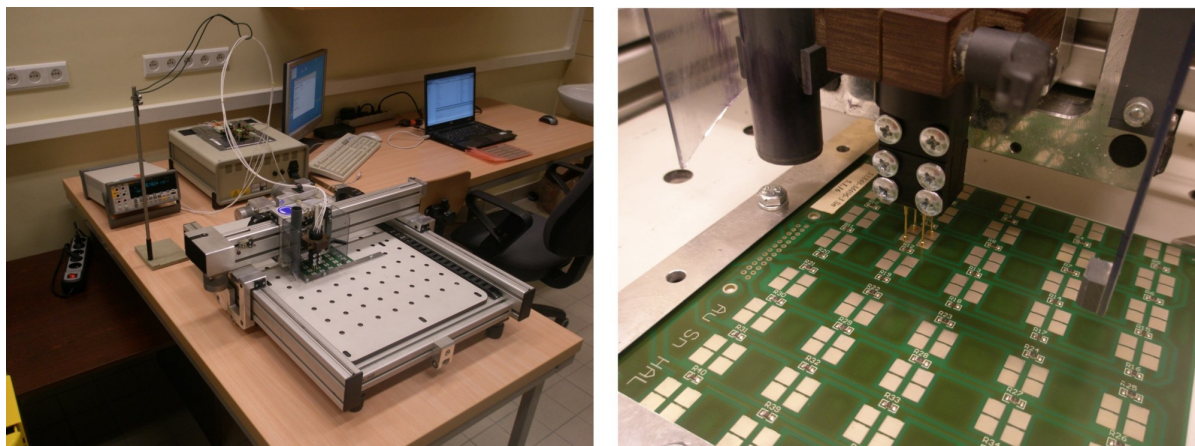
Do powtarzalnego i precyzyjnego przemieszczania głowicy pomiarowej w trójwymiarowej przestrzeni wykorzystano maszynę CNC (firmy ASTROSYN) [86]. Głowicę pomiarową, system powtarzalnego mocowania płytek i inne elementy niezbędne do prowadzenia pomiarów, a także program sterowania ruchem głowicy pomiarowej opracowano i wykonano specjalnie dla potrzeb niniejszej pracy.

Głowica pomiarowa zawiera cztery sondy pomiarowe podłączone przewodami do multimetru. Jako sond pomiarowych użyto pozłacanych, sprężynujących igieł wyprodukowanych przez firmę INGUN, uznanego producenta systemów testowania sprzętu elektronicznego [87]. Zbadano wpływ kształtu zwieńczenia użytych igieł na powtarzalność pomiarów. Szczegółowemu badaniu poddano igły o dwóch różnych zwieńczeniach (rysunek 6.3). Badania wykazały, iż używając igieł zakończonych końcówką A (rysunek 6.3) uzyskano większą powtarzalność wyników pomiarów (odchylenie standardowe z serii 100 pomiarów rzędu $10^{-5} \Omega$) niż używając igieł zakończonych końcówką B (odchylenie standardowe z serii 100 pomiarów rzędu $10^{-4} \Omega$). Do pomiarów wybrano zatem igły zakończone końcówką A.



Rysunek 6.3: Zwieńczenia badanych igieł pomiarowych

Konstrukcja głowicy pomiarowej oraz system sterowania maszyny CNC umożliwia uzyskanie stałej siły docisku sond do powierzchni kontaktów, co zapewnia wysoką powtarzalność pomiarów (precyzję pomiarów). System pomiarowy oraz głowicę szczegółowo pokazano na rysunku 6.4.



Rysunek 6.4: System pomiarowy oraz głowica pomiarowa z czterema igłami pomiarowymi. Poniżej głowicy widoczne pola kontaktowe do pomiaru rezystancji połączeń

Jednostką centralną systemu pomiarowego jest mikrokontroler NE64 firmy Freescale, który odpowiedzialny jest za realizację kilku zadań. Mikrokontroler steruje ruchem głowicy pomiarowej (w osiach x, y oraz z), programuje nastawy multimetru cyfrowego, odczytuje i konwertuje dane pomiarowe oraz wysyła pakiety danych do komputera przez sieć Ethernet (protokół UDP, ang. User Datagram Protocol) [88]. Dedykowana aplikacja użytkownika uruchomiona na komputerze podłączonym do sieci przechwytuje pakiety UDP, po czym zapisuje dane w pliku o formacie CSV, obsługiwanym przez większość arkuszy kalkulacyjnych, co ułatwia obróbkę statystyczną danych.

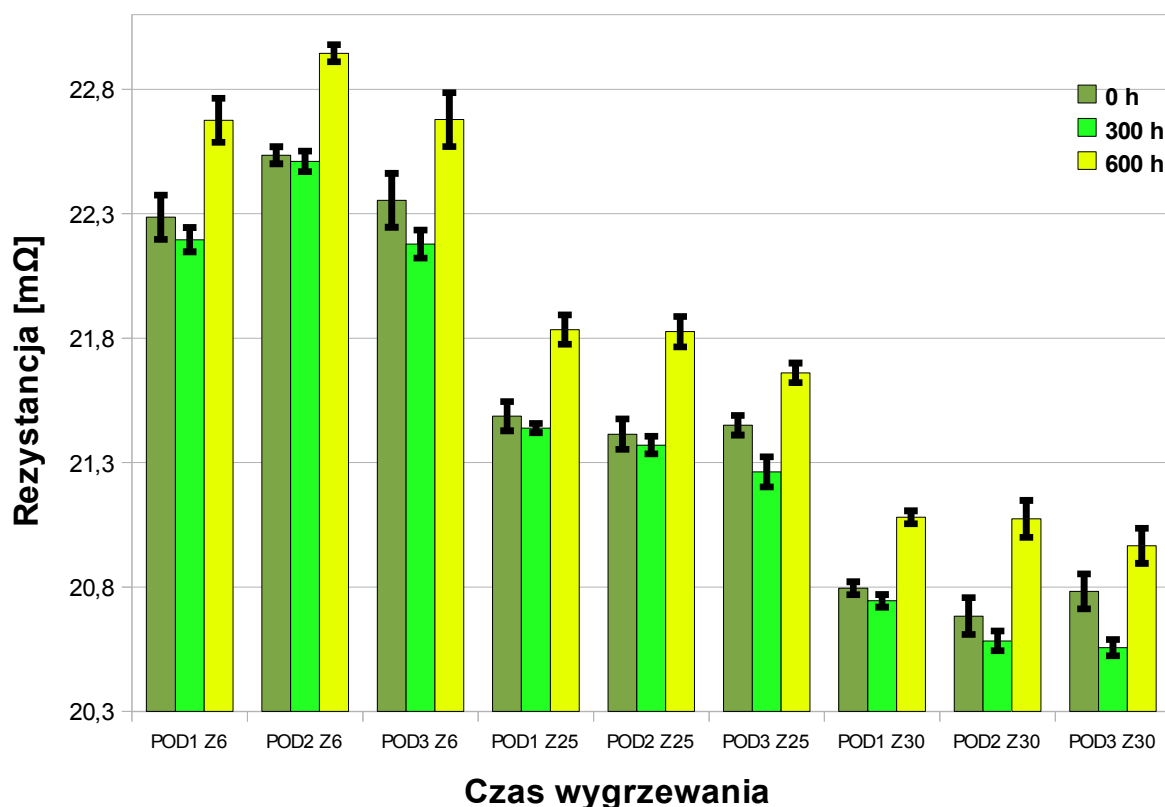
W celu zwiększenia powtarzalności (precyzji) pomiarów małych rezystancji zapewniono:

- stałą temperaturę w pomieszczeniu, w którym prowadzone były pomiary,
- stały docisk sond pomiarowych zakończonych wieloma igłami w celu przebicia warstw tlenku na polach kontaktowych,
- kontakt sond pomiarowych z polami kontaktowymi w tych samych miejscach.

Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów należało odpowiedzieć na dwa pytania: czy system pomiarowy jest na tyle czuły (precyzyjny) aby mógł wykazać zmiany mierzonej rezystancji wskutek wzrostu faz międzymetalicznych w złączu implikowanych procesem

starzenia oraz, czy system pomiarowy w istocie mierzy wyłącznie zmiany rezystancji w złączu.

Dla uzyskania odpowiedzi na pierwsze z postawionych pytań poddano badaniom złącza lutowane stopem SAC B na powłóce ochronnej ENIG. Do badań wybrano 3 płytki testowe, oznaczone jako POD1, POD2, POD3 (rysunek 6.5). Przy użyciu systemu pomiarowego przeprowadzono pomiary rezystancji połączeń (ścieżka + dwa złącza + zwora SMD 1206, rysunek 6.1). Rezystancję każdego połączenia zmierzono dziewięciokrotnie. W celu uniknięcia błędnej interpretacji wyników wynikającej z rozrzutu wartości mierzonych połączeń do dalszych badań wybrano 9 połączeń (po 3 połączenia z każdej płytki), które podzielono na 3 grupy według zmierzonej wartości rezystancji (Z6, Z25, Z30, rysunek 6.5). Wartości średnie badanych połączeń przed i po procesach starzenia zebrano na wykresie pokazanym na rysunku 6.5.



Rysunek 6.5: Testowe badania zmian rezystancji połączeń poddawanych procesom starzenia. Złącza lutowane stopem SAC B na powłokach ENIG

Średnia wartość rezystancji zwór obliczona na podstawie 27 pomiarów przed procesami wygrzewania wyniosła:

- $22,4 \text{ m}\Omega \pm 0,11 \text{ m}\Omega$ w przypadku pierwszej grupy zwór (na wykresie oznaczone jako Z6),
- $21,4 \text{ m}\Omega \pm 0,06 \text{ m}\Omega$ w przypadku drugiej grupy zwór (na wykresie oznaczone jako Z25),
- $20,1 \text{ m}\Omega \pm 0,06 \text{ m}\Omega$ w przypadku trzeciej grupy zwór (na wykresie oznaczone jako Z25).

Średnia wartość rezystancji zwór obliczona na podstawie 27 pomiarów po 600 h wygrzewania wyniosła:

- $22,6 \text{ m}\Omega \pm 0,33 \text{ m}\Omega$ w przypadku pierwszej grupy zwór (na wykresie oznaczone jako Z6),
- $22,1 \text{ m}\Omega \pm 0,4 \text{ m}\Omega$ w przypadku drugiej grupy zwór (na wykresie oznaczone jako Z25),
- $21 \text{ m}\Omega \pm 0,06 \text{ m}\Omega$ w przypadku trzeciej grupy zwór (na wykresie oznaczone jako R25).

Jak widać z rysunku 6.5, we wszystkich przypadkach zaobserwowane zmiany rezystancji wynikające z przeprowadzonych procesów starzenia znacznie przekraczają wartość odchylenia standardowego pomiarów.

Wyniki pomiarów poddano dodatkowo dwuczynnikowej analizie wariancji (ANOVA).

W przypadku wszystkich grup przeprowadzono analizę przyjmując następujące czynniki:

- połączenie (czynnik A): zwora przylutowana na płycie POD1 (A1), zwora przylutowana na płycie POD2 (A2), zwora przylutowana na płycie POD3 (A3),
- czas wygrzewania (czynnik B): 0 godzin (B1), 300 godzin (B2), 600 godzin (B3).

Wyniki analizy ANOVA dla poszczególnych grup zwór zamieszczono w tabeli 6.1.

Procentowy udział błędu w przypadku każdej z grup jest mały, co oznacza, że żadne istotne czynniki wpływające na mierzoną rezystancję nie zostały pominięte, warunki prowadzenia eksperymentu były w pełni kontrolowane i błąd pomiarowy nie był istotny. We wszystkich trzech grupach czynnik B (czas starzenia) miał największy udział procentowy w wariancji wartości wielkości mierzonej, co jednoznacznie wskazuje na to, że system pomiarowy jest wystarczająco czuły dla wykazania zmian mierzonej rezystancji wskutek

wzrostu faz międzymetalicznych w złączu implikowanych procesem starzenia.

	Pierwsza grupa		Druga grupa		Trzecia grupa	
	F Współczynnik	P Udział procentowy	F Współczynnik	P Udział procentowy	F Współczynnik	P Udział procentowy
A	151,82***	26	44,51***	7	35,94***	6
B	389,61***	67	503,21***	83	483,42***	82
AxB	3,10**	1	10,82***	3	15,06***	5
e (błąd)		7		7		7
suma		100		100		100

*Tabela 6.1: Rezultaty dwuczynnikowej analizy wariancji zmierzonej rezystancji struktur (F-test: *** - 99% poziom ufności, ** - 95% poziom ufności)*

Mierzona rezystancja jest sumą szeregowo połączonych rezystancji dwóch złączy lutowanych, rezystancji zwory i rezystancji ścieżki o długości kilku milimetrów (rysunek 6.1). Jednak celem pomiarów była ocena zmiany rezystancji wyłącznie złączy wskutek wzrostu faz międzymetalicznych stymulowanego procesem starzenia. Oznacza to, że pozostałe składniki mierzonej rezystancji powinny być niezmiennie po długotrwałym starzeniu (wygrzewaniu).

O ile można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że pola kontaktowe pokryte warstwą złota nie są podatne na procesy utleniania i mają stabilną rezystancję, o tyle badania stabilności rezystancji zwór było niezbędne. W tym celu trzydzieści losowo wybranych zwór SMD o wymiarze 1206 podzielono na trzy grupy. Pierwszą grupę zwór przylutowano ręcznie do powierzchni płytki testowej bezpośrednio po dokonaniu wyboru zwór. Drugą i trzecią grupę zwór przylutowano do powierzchni tej samej płytki po uprzednim poddaniu zwór starzeniu przez odpowiednio 300 i 600 godzin w temperaturze 150°C. Po przylutowaniu zwór do powierzchni płytki przeprowadzono pomiary ich rezystancji przy użyciu opracowanego systemu pomiarowego. Dla żadnego z połączeń odchylenie standardowe z serii 72 pomiarów rezystancji nie przekroczyło 140 $\mu\Omega$.

Wartości średnie rezystancji badanych 30 połączeń poddano jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA). Badanym czynnikiem był czas starzenia (czynnik A). Analiza wykazała, iż udział procentowy czynnika A w wariancji wartości rezystancji połączeń jest bliski zeru. Udział procentowy błędu w wariancji bliski 100% wskazuje, iż czas starzenia nie ma istotnego wpływu na rezystancję połączeń oraz, że pominięto istotny czynnik podczas analizy.

Prawdopodobnie wariancja wartości mierzonej rezystancji wynika jedynie z rozrzutu wartości rezystancji zwór a także z rezystancji złączy wykonanych w procesie ręcznego lutowania. Przeprowadzone badania wykazały, że rezystancja zwór używanych podczas badań nie ulega istotnym zmianom wskutek poddawania zwór procesom starzenia.

Na podstawie przeprowadzonego testu można przyjąć, że opracowany system pomiarowy w istocie mierzy zmiany rezystancji złącza wynikające ze wzrostu faz międzymetalicznych.

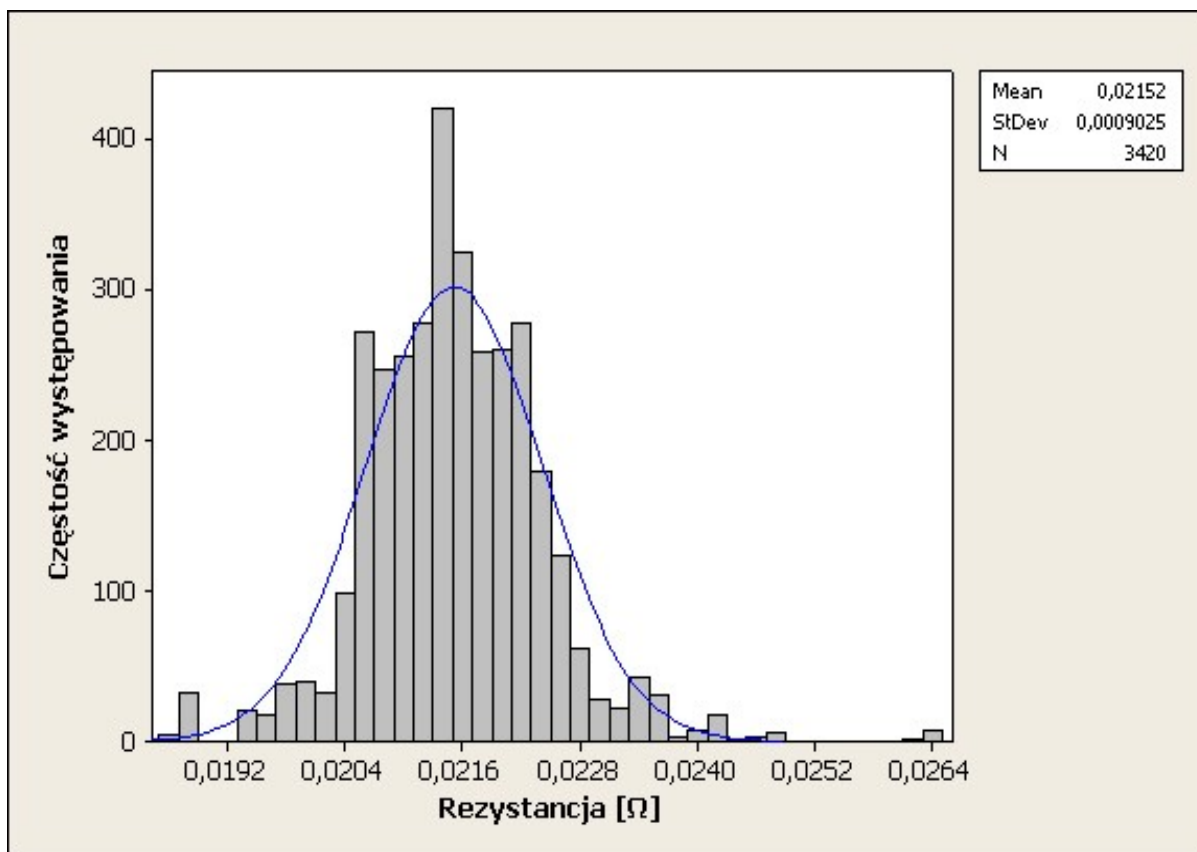
6.2 Procedura pomiarowa

Ze względu na dużą liczbę pomiarów, koniecznym było określenie optymalnej prędkości poruszającej się głowicy pomiarowej zapewniającej powtarzalne pozycjonowanie głowicy nad polami kontaktowymi znajdującymi się przy rezystorach SMD i właściwy pomiar w jak najkrótszym czasie. Maszyna CNC przemieszczająca głowicę z maksymalną prędkością umożliwia przeprowadzenie pełnej procedury pomiarowej (40 zwór, 360 pomiarów rezystancji) pojedynczej płytki w czasie ośmiu minut. Jednak decydującym okazał się minimalny czas potrzebny na ustabilizowanie wskazań miernika po zetknięciu sond pomiarowych z polami kontaktowymi. Oceniono, że czas ten powinien wynosić jedną sekundę. W efekcie cykl pomiarowy wszystkich połączeń na jednej płytce obwodu drukowanego przebiegał według następującej procedury: Głowica znajdując się nad pomiarowymi polami kontaktowymi zwory opuszczana jest na określoną wysokość dociskając igły pomiarowe do ich powierzchni. W momencie dociśnięcia igieł do powierzchni pól kontaktowych wykonywane są trzy pomiary rezystancji w odstępach jednosekundowych. Następnie głowica podnoszona jest na wysokość zapewniającą utratę kontaktu igieł z polami kontaktowymi, po czym opuszczana jest ponownie w celu przeprowadzenia kolejnych trzech pomiarów. Procedura podnoszenia i opuszczania igieł powtarzana jest trzykrotnie, po czym głowica przesuwana jest nad pola kontaktowe kolejnego połączenia. Tak więc rezystancja każdej z przylutowanych zwór mierzona jest dziewięciokrotnie. Łącznie pomiar całego zestawu połączeń na jednej płytce obwodu drukowanego trwał 8 minut.

Dla oceny stabilności rezystancji elektrycznej połączeń zawierających fazy międzymetaliczne przeprowadzono łącznie 140 tysięcy pomiarów, poddając badaniom 19200 złączy lutowanych.

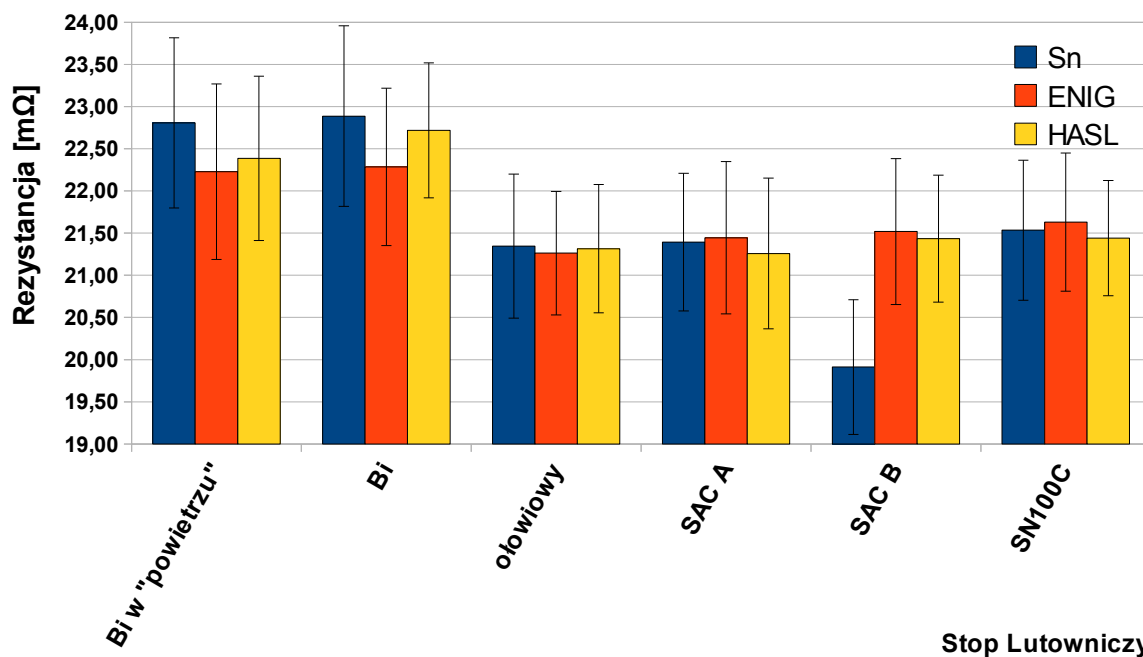
6.3 Ocena stabilności rezystancji złączy lutowanych w zależności od zastosowanych stopów lutowniczych i powłok

Na rysunku 6.6 pokazano przykład histogramu zmierzonych wartości rezystancji dla zestawu materiałów - stop SAC A i powłoka ENIG. Podobne rozkłady uzyskano dla innych zestawień materiałowych. Jak widać zmierzona rezystancja podlega rozkładowi normalnemu, co oznacza, że proces jest pod kontrolą statystyczną.



Rysunek 6.6: Histogram wykreślony na podstawie 3420 pomiarów rezystancji 300 zwór (600 złączy lutowanych)

Testowano wszystkie zestawienia materiałowe wymienione w tabeli 4.2. Wyniki, w postaci wartości średnich rezystancji złączy, których nie poddano procesom starzenia pokazano na rysunku 6.7. Wartość średnią w przypadku każdej konfiguracji materiałowej wyliczono na podstawie 1440 pomiarów rezystancji 160 przylutowanych zwór SMD 1206.

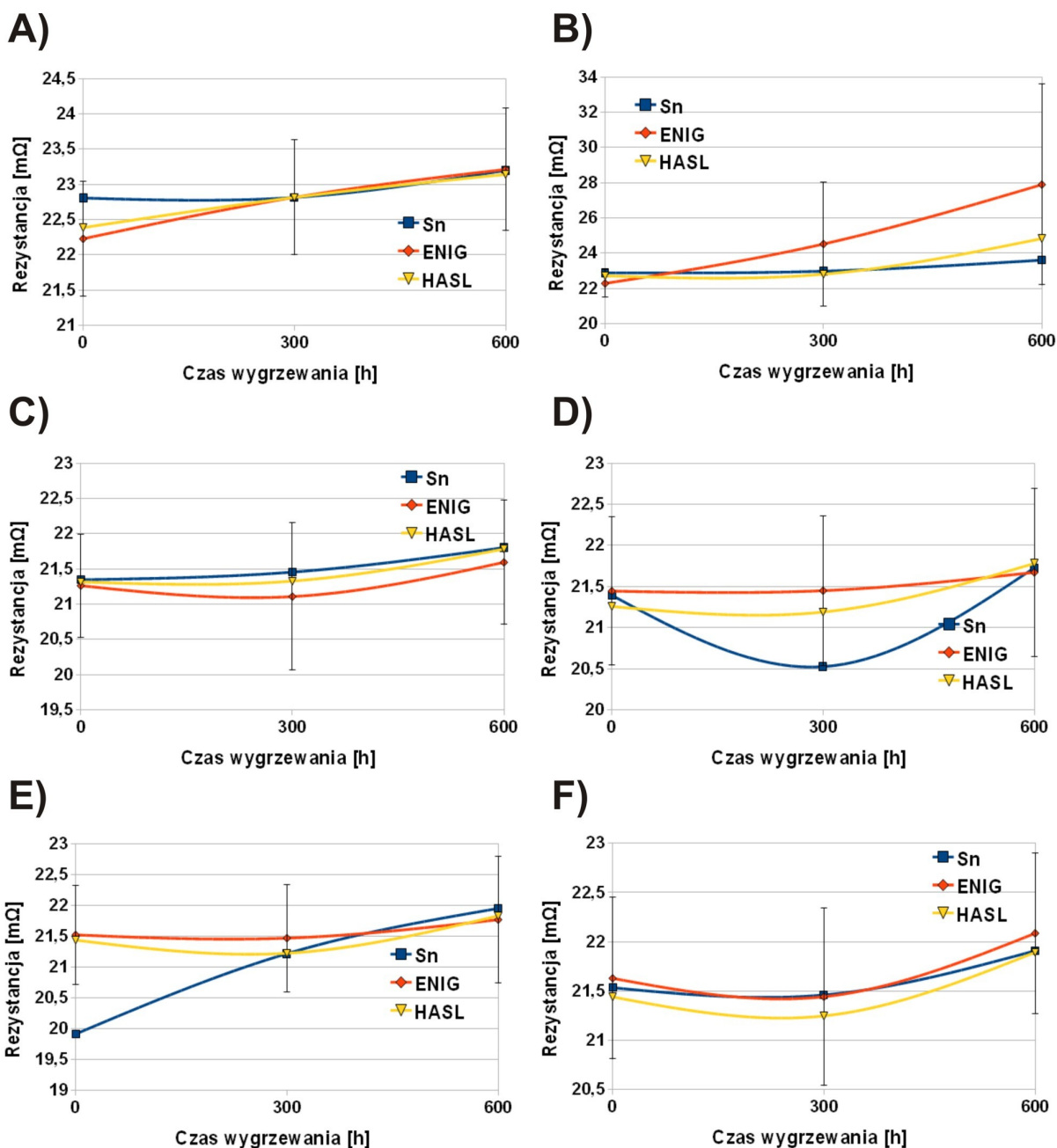


Rysunek 6.7: Wpływ składu stopu lutowniczego oraz powłoki na rezystancję przylutowanych zwór SMD 1206, których nie poddano procesom starzenia (Bi – stop niskotemperaturowy)

W kolejnym kroku połączenia poddano procesom starzenia. Zmiany rezystancji złączy w funkcji czasu wygrzewania pokazano na rysunku 6.8. Wartości średnie rezystancji złączy wykonanych stopami SAC A, SAC B oraz SN100C obliczono na podstawie 540 pomiarów połączeń (120 złączy lutowanych). Pozostałe wyniki poddano na podstawie 360 pomiarów rezystancji 40 połączeń (80 złączy lutowanych).

Generalnie zaobserwowano wzrost rezystancji złączy po procesie starzenia. Jednak w większości badanych zestawień materiałowych zmiany wartości rezystancji złączy nie przekroczyły kilku procent. Jedynie połączenia wykonane stopem niskotemperaturowym w atmosferze powietrza na powłokach ENIG cechowały się mniejszą stabilnością rezystancji podczas starzenia - zmiana wartości rezystancji przekroczyła 25% wartości początkowej.

W większości zestawień materiałowych wartość odchylenia standardowego z serii pomiarów przekroczyła zmiany rezystancji wywołane procesami starzenia, co utrudnia jednoznaczną interpretację oceny wpływu faz międzymetalicznych na rezystancję złączy. Z tego względu wykonano planowany eksperyment, w którym wzięto pod uwagę wyłącznie stopy lutownicze o podobnym składzie i zbliżonych wartościach rezystancji. Jak wynika z rysunku 6.7, warunek taki spełniają stopy SAC A, SAC B i SN100C.



Rysunek 6.8: Zmiany średnich wartości rezystancji zwoń przylutowanych : A) stopem niskotemperaturowym w atmosferze powietrza, B) stopem niskotemperaturowym w atmosferze ochronnej azotu, C) stopem ołowiowym, D) stopem SAC A, E) stopem SAC B, F) stopem SN100C

W eksperymencie przyjęto następujące czynniki i ich poziomy:

- skład powłoki pola lutowniczego (czynnik A): ImSn (A1), ENIG (A2), HASL (A3),
- stop lutowniczy (czynnik B): SAC A(B1), SAC B(B2), SN100C (B3),
- czas wygrzewania (czynnik C): 0 godzin (C1), 300 godzin (C2), 600 godzin (C3).

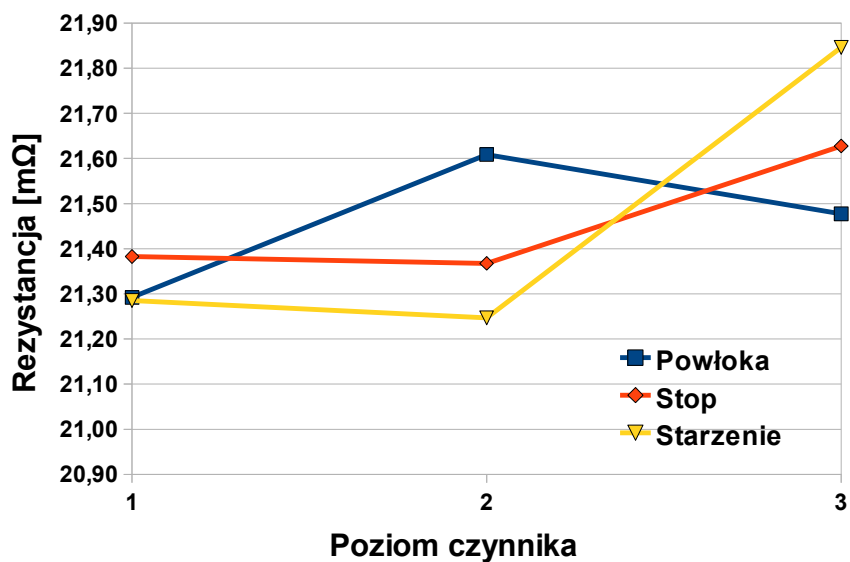
Miarą eksperymentu była wartość średnia rezystancji złącza, wyliczona na podstawie 540 pomiarów 60 połączeń (120 złączy). Wyniki analizy ANOVA eksperymentu zamieszczono w tabeli 6.2. Sumy kwadratów czynników i interakcji nieistotnych dodano do puli błędu e_{pooled} .

	SS Suma kwadratów	V Stopnie swobody	V wariancja	F Współczynnik	SS' Wartość oczekiwana	P Udział procentowy
A	$4,55 \cdot 10^{-7}$	2	$2,28 \cdot 10^{-7}$			
B	$3,84 \cdot 10^{-7}$	2	$1,92 \cdot 10^{-7}$			
C	$2,03 \cdot 10^{-6}$	2	$1,01 \cdot 10^{-6}$	8,01***	$1,77 \cdot 10^{-6}$	35
AxB	$2,85 \cdot 10^{-7}$	4	$7,12 \cdot 10^{-8}$			
AxC	$3,23 \cdot 10^{-7}$	4	$8,07 \cdot 10^{-8}$			
BxC	$4,10 \cdot 10^{-7}$	4	$1,02 \cdot 10^{-7}$			
AxBxC	$1,18 \cdot 10^{-6}$	8	$1,47 \cdot 10^{-7}$			
suma	$5,06 \cdot 10^{-6}$	26				100
e_{pooled}	$7,08 \cdot 10^{-7}$	24	$1,26 \cdot 10^{-7}$		$3,29 \cdot 10^{-6}$	65

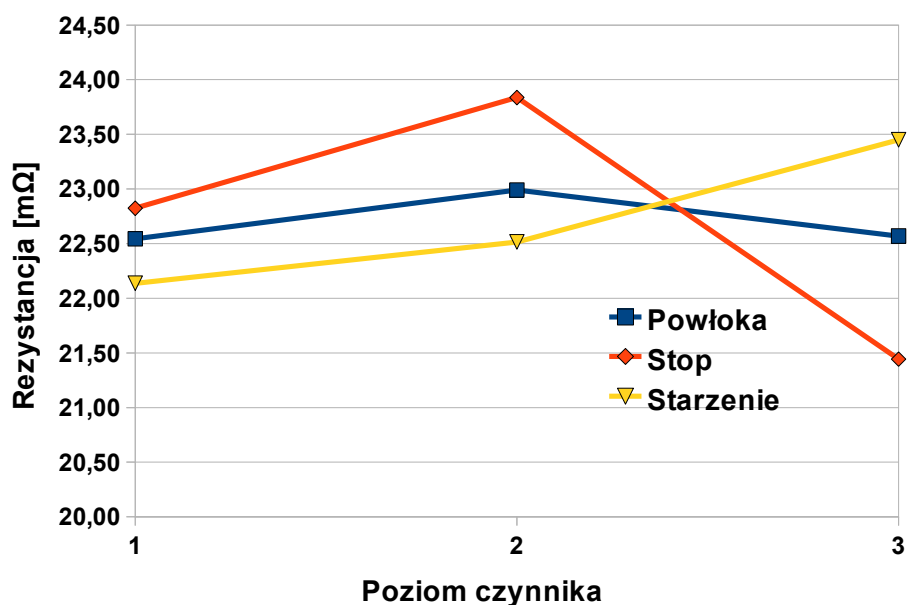
Tabela 6.2: Rezultaty trzyczynnikowej analizy wariancji wartości średniej rezystancji złączy przylutowanych stopami SAC A, SAC B i SN100C (F-test: *** - 99% poziom ufności)

Jak widać, mimo stosunkowo dużego udziału błędu (spowodowanego prawdopodobnie stosunkowo dużym rozrzutem rezystancji zwór), bezsprzecznie najistotniejszy wpływ na wynik eksperymentu ma czynnik C, a więc czas starzenia. Z tzw. wykresu efektów głównych (rysunek 6.9) można oszacować, że po 600 godzinach starzenia wartość rezystancji złącza wzrasta o około 2,6%.

Znacznie większe zmiany wartości rezystancji uzyskano przez wybór stopu lutowniczego. W kolejnym eksperymencie, w którym analizowano wpływ pozostałych stopów (pierwsze trzy przedstawione na rysunku 6.7) na wartość rezystancji złącza, dominującym czynnikiem był rodzaj stopu lutowniczego a wykresy efektów głównych wskazują na różnice rezystancji złączy dochodzące do 11%. Wykres efektów głównych pokazano na rysunku 6.10.



Rysunek 6.9: Wykres efektów głównych analizy wariancji wartości średniej rezystancji złączy przylutowanych stopami SAC A, SAC B i SN100C



Rysunek 6.10: Wykres efektów głównych analizy wariancji wartości średniej rezystancji złączy przylutowanych stopem niskotemperaturowym w atmosferze powietrza oraz azotu, oraz stopem ołowiowym

W eksperymencie przyjęto następujące poziomy czynniki:

- skład powłoki pola lutowniczego (czynnik A): ImSn (A1), ENIG (A2), HASL (A3),
- stop lutowniczy (czynnik B): niskotemperaturowy, lutowanie w powietrzu (B1),

niskotemperaturowy, lutowanie w azocie (B2), ołowiowy (B3),

- czas wygrzewania (czynnik C): 0 godzin (C1), 300 godzin (C2), 600 godzin (C3),

a wyniki analizy wariacyjnej ANOVA eksperymentu zamieszczono w tabeli 6.3. Wartość średnią rezystancji w przypadku każdej obserwacji wyliczono na podstawie 360 pomiarów 40 połączeń zwór SMD1206 (80 złączy). Sumy kwadratów czynników i interakcji nieistotnych dodano do puli błęd e_{pooled} .

	SS Suma kwadratów	v Stopnie swobody	V wariancja	F Współczynnik	SS' Wartość oczekiwana	P Udział procentowy
A	$1,13 \cdot 10^{-6}$	2	$5,66 \cdot 10^{-7}$			
B	$2,60 \cdot 10^{-5}$	2	$1,30 \cdot 10^{-5}$	16,38***	$2,46 \cdot 10^{-5}$	48
C	$8,23 \cdot 10^{-6}$	2	$4,11 \cdot 10^{-6}$	5,19**	$6,88 \cdot 10^{-6}$	13
AxB	$4,21 \cdot 10^{-6}$	4	$1,05 \cdot 10^{-6}$			
AxC	$2,51 \cdot 10^{-6}$	4	$6,29 \cdot 10^{-7}$			
BxC	$5,48 \cdot 10^{-6}$	4	$1,37 \cdot 10^{-6}$			
AxBxC	$4,12 \cdot 10^{-6}$	8	$5,15 \cdot 10^{-7}$			
suma	$5,17 \cdot 10^{-5}$	26				100
e_{pooled}	$1,75 \cdot 10^{-5}$	22	$7,93 \cdot 10^{-7}$		$2,06 \cdot 10^{-5}$	40

Tabela 6.3: Rezultaty trzyczynnikowej analizy wariacji wartości średniej rezystancji złączy przylutowanych stopem niskotemperaturowym w atmosferze powietrza oraz azotu, oraz stopem ołwiowym (F-test: *** - 99% poziom ufności, ** - 95% poziom ufności)

Z przeprowadzonych badań wynika, że wartość rezystancji złącza jest w znacznym stopniu zależna od użytego stopu lutowniczego. Rezystancja złączy lutowanych stopem ołwiowym jest o około 2 mΩ mniejsza niż złączy lutowanych stopem niskotemperaturowym (zarówno w atmosferze powietrza jak i azotu). Na te znaczne różnice nie mają istotnego wpływu ani rodzaje powłok lutowniczych, ani też wzrost faz międzymetalicznych wynikający z procesów starzenia. Przy stosowaniu stopów lutowniczych o podobnym składzie wzrost faz międzymetalicznych (rozdział 5) w nieznacznym stopniu wpływa na zmianę rezystancji złącza. Oznacza to, że badane złącza cechuje długoterminowa stabilność rezystancji. Biorąc pod uwagę wcześniejsze analizy dotyczące wpływu procesów starzenia na mikrostrukturę złączy (tabela 3.4) można uznać, że złącza wykonane przy użyciu badanych materiałów zapewnią wieloletnią stabilną pracę urządzeń w przypadku braku narażeń środowiskowych i mechanicznych [89].

7 Wytrzymałość mechaniczna połączeń

7.1 Połączenia mechaniczne

Jedną z podstawowych funkcji połączeń w montażu elektronicznym jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej łączonych elementów. Przeprowadzona analiza mikroskopowa zglądów złączy lutowanych (rozdział 5.2) wykazała, iż mikrostruktura złączy nie jest jednorodna i może zawierać defekty. Mikrostruktura zależy od składu stopu lutowniczego, składu powłoki ochronnej pól lutowniczych oraz czasu i temperatury ich przechowywania. Zazwyczaj złącza poddawane procesom starzenia cechowały się grubszymi warstwami faz międzymetalicznych a dla niektórych zestawów materiałowych obserwowano nowe fazy międzymetaliczne. Zarówno defekty, jak i fazy międzymetaliczne mogą wpływać na wytrzymałość mechaniczną połączeń.

Podstawowym kryterium oceny wytrzymałości mechanicznej połączeń lutowanych jest wartość dopuszczalnego naprężenia ścinającego, której przekroczenie nieodwracalnie degraduje strukturę złączy. Kryterium jest szczególnie przydatne w przypadku analiz porównawczych i oceny wpływu czynników technologicznych na wytrzymałość mechaniczną połączeń lutowanych.

Przez ścinanie rozumie się umownie ogólnie przypadek wytrzymałościowy, w którym układ sił wewnętrznych sprowadza się do siły F działającej w płaszczyźnie przekroju elementu lub w płaszczyźnie złącza. Techniczne uproszczone obliczenia są oparte na warunku wytrzymałościowym na ścinanie określonym dla naprężenia średniego:

$$\tau = \frac{F}{S} \leq k_t, \quad (7.1)$$

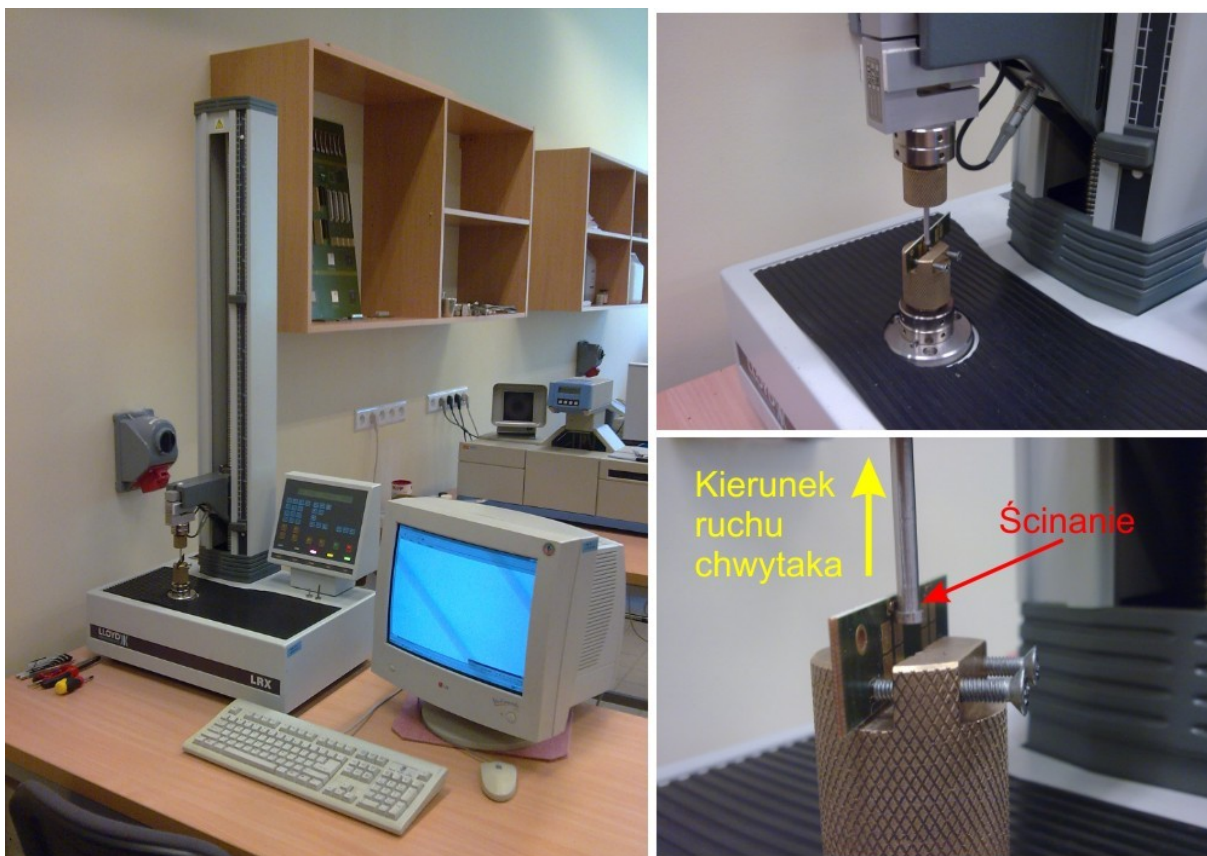
w którym:

- τ – średnie naprężenie tnące,
- F – siła poprzeczna (tnąca),
- S – pole przekroju,
- k_t – naprężenie dopuszczalne na ścinanie.

7.2 System pomiarowy

Do badań wytrzymałości mechanicznej wybrano połączenia lutowane zwór SMD 1206 do pól lutowniczych płytek obwodów drukowanych wykonanych zgodnie z opisem zawartym w rozdziale 4.1. Przejęto, że powtarzalny proces technologiczny lutowania przy niezmiennych rozmiarach pól lutowniczych płytek obwodów drukowanych i elementów w całym eksperymencie uzasadnia założenie, że powierzchnia badanych połączeń S jest stała i o wytrzymałości mechanicznej decyduje minimalna siła, która powoduje zniszczenie połączenia.

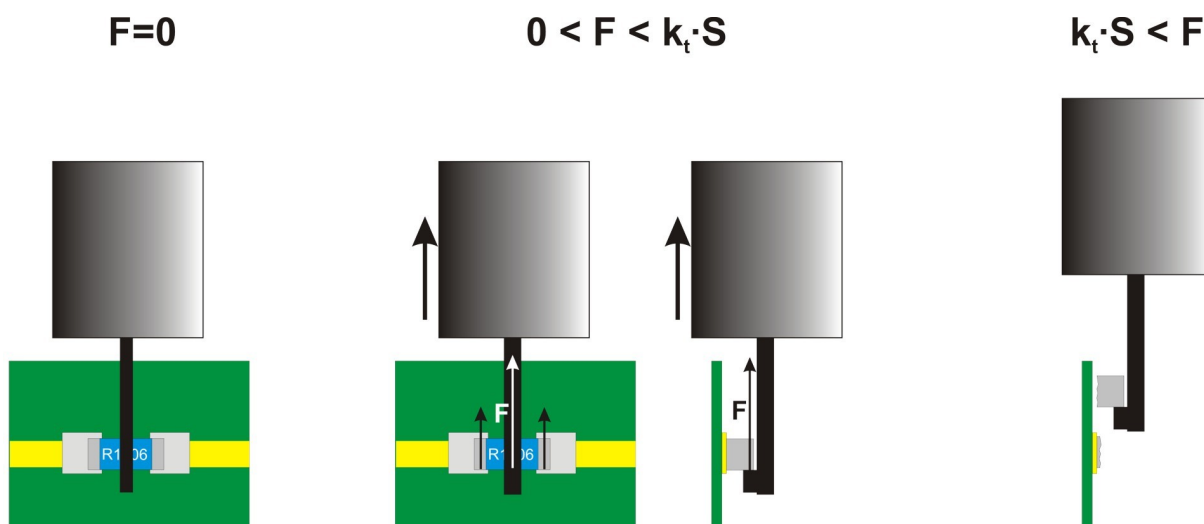
Pomiary sił ścinania przeprowadzono przy użyciu zrywarki LRX LLOYD Instruments (rysunek 7.1). W części nieruchomej urządzenia zainstalowano system mocowania płytki obwodu drukowanego z przylutowanym elementem. Aby ograniczyć wpływ elastycznego odkształcenia płytki na wynik pomiaru, badaniom poddawano jedynie fragmenty płytki o wielkości zdeterminowanej geometrią systemu mocowania. Do ruchomej tensometrycznej głowicy dołączono chwytak z pazurem ścinającym w taki sposób, aby siła oddziaływania na badane połączenie była skierowana wyłącznie w kierunku równoległym do płaszczyzn pól lutowniczych. Oznaczało to eliminację innych sił, na przykład odrywających.



Rysunek 7.1: Stanowisko badawcze do pomiaru siły ścinającej połączenia lutowane

Pazurem ścinającym chwytaka zaczepiano przylutowany element dokładnie w miejscu równoległym od obu złączy lutowanych (rysunek 7.2). Po przyłożeniu siły ścinającej system zrywarki rejestrował wykres rozciągania i oznaczał wartość siły F_m powodującą zerwanie połączenia.

Z uwagi na przyjęte wcześniej założenie ($S = \text{const.}$), minimalna siła F_m jest proporcjonalna do dopuszczalnego naprężenia k_t , a zatem może być miarą wytrzymałości mechanicznej całego połączenia, lub wartość $\frac{1}{2} F_m$ – miarą wytrzymałości pojedynczego złącza. Dla oceny wytrzymałości mechanicznej połączeń lutowanych (rozdział 7.3) nazwę „siła ścinania” odniesiono do pojedynczego złącza.



k_t - wytrzymałość na ścinanie
 S - pole przekroju poprzecznego złącza
 F - zewnętrzna siła

Rysunek 7.2: Przebieg pomiaru wytrzymałości złącza na siły ścinania

7.3 Wytrzymałość mechaniczna złącza

Do badań wybrano po 10 połączeń reprezentujących każdą z badanych konfiguracji materiałowych. Testom poddano łącznie 540 połączeń zawierających po dwa złącza (180 połączeń nie poddawanych procesom starzenia, oraz po 180 połączeń poddawanych starzeniu odpowiednio przez 300 oraz 600 godzin).

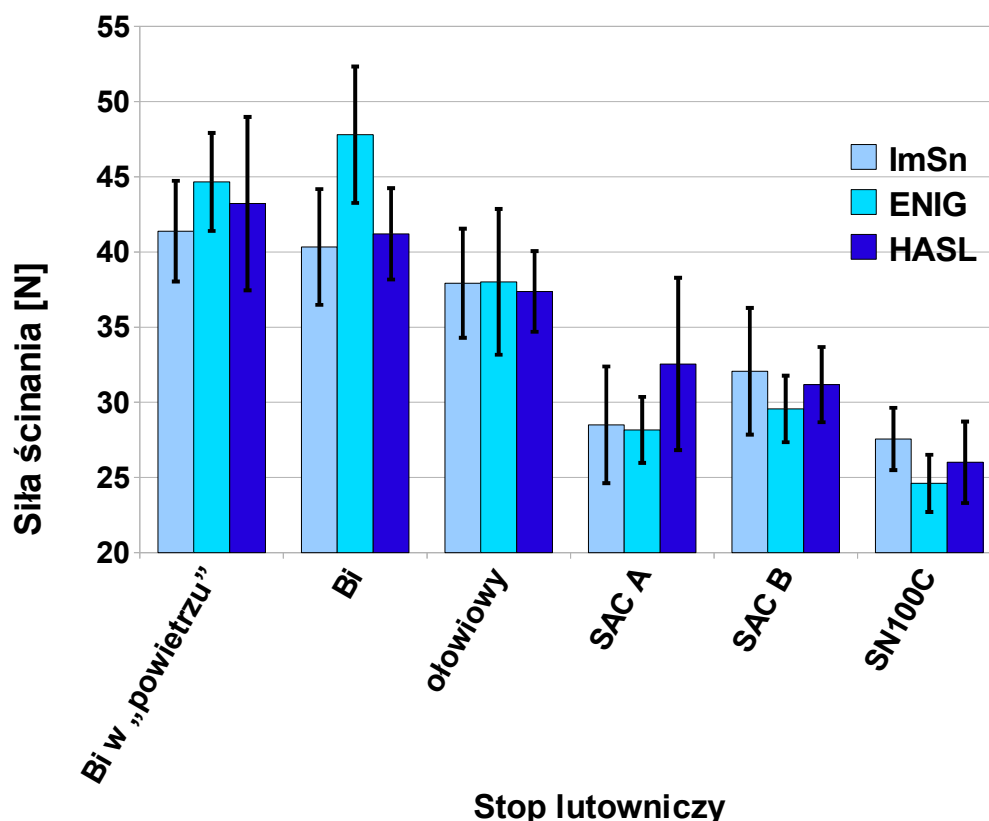
Wyniki testów, w postaci średnich wartości sił ścinających pojedyncze złącze $\frac{1}{2} F_m$ przedstawiono na rysunkach 7.3 i 7.4. Rysunek 7.3 pokazuje wytrzymałość złącza różnych zestawów materiałowych stop lutowniczy – powłoka pola lutowniczego (bez względu na okres starzenia), natomiast na rysunku 7.4 przedstawiono wpływ czasu starzenia na wytrzymałość złącza wykonanych różnymi stopami lutowniczymi (bez względu na rodzaj powłoki).

Na podstawie przedstawionych na rysunkach 7.3 i 7.4 wyników badań można wnioskować że:

1. Niezależnie od użytej powłoki ochronnej, złącza lutowane stopem zawierającym ołów a także niskotemperaturowym, bezołowiowym stopem na bazie bizmutu (zarówno lutowane w atmosferze powietrza – Bi w „powietrzu”, jak i w atmosferze azotu – Bi) są bardziej wytrzymałe niż złącza wykonane stopami bezołowiowymi SAC A, SAC B ($T_S=217^\circ\text{C}$, $T_L=219^\circ\text{C}$) oraz SN100C (227°C).
2. Wpływ powłoki ochronnej na wytrzymałość złącza nie jest jednoznaczny. Złącza na

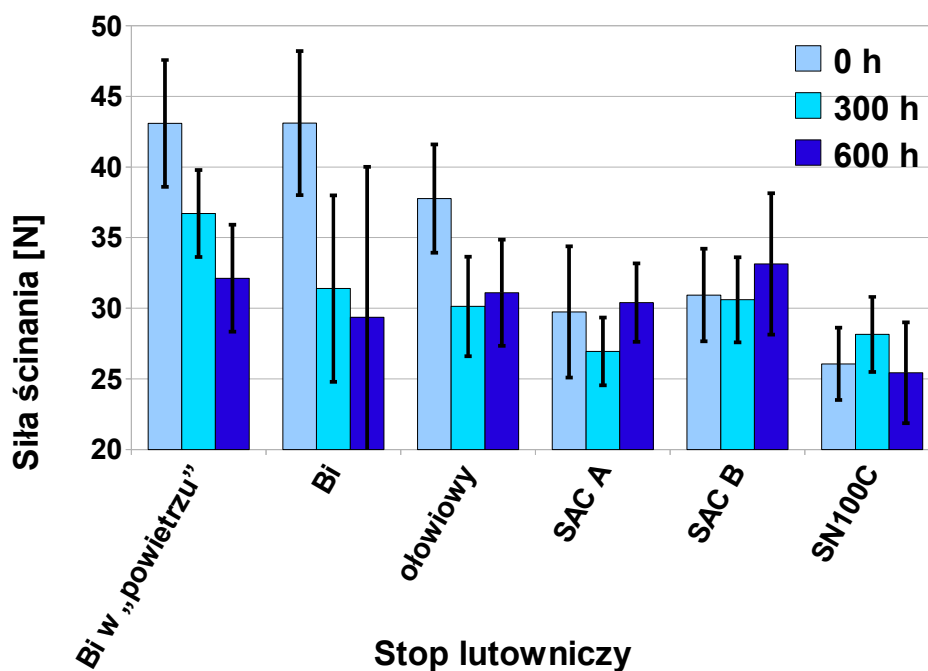
powłokach ENIG są najmniej wytrzymałe na siły ścinania przy lutowaniu stopami SAC A, SAC B oraz SN100C, podczas gdy złącza na tych samych powłokach lutowane stopem ołowiowym oraz niskotemperaturowym są najbardziej wytrzymałe.

3. Wpływ procesów starzenia na wytrzymałość mechaniczną złączy jest zauważalny jedynie w przypadku złączy lutowanych stopem ołowiowym oraz niskotemperaturowym, bezołowiowym stopem na bazie bizmutu.



Rysunek 7.3: Wytrzymałość złączy różnych zestawów materiałowych stop lutowniczy – powłoka pola lutowniczego (średnia wartość siły ścinania złączy wyliczona na podstawie 60 zmierzonych wartości), Bi – stop niskotemperaturowy

Obliczone wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych serii pomiarów wahają się w przedziale 5-10% wartości średniej w przypadku złączy lutowanych bezołowiowymi stopami SAC A, SAC B, SN100C oraz stopem ołowiowym. W przypadku złączy lutowanych stopem niskotemperaturowym wartość odchylenia standardowego waha się w przedziale 10-20% wartości średniej. Takie rozrzuty wyników pomiarowych utrudniają jednoznaczną interpretację wyników. Z tego powodu podjęto próbę oceny wpływu poszczególnych czynników na wytrzymałość mechaniczną złączy prowadząc planowany eksperyment i wariacyjną analizę wyników.



Rysunek 7.4: Średnia wartość siły ścinania złączy wyliczona na podstawie 30 pomiarów, Bi – stop niskotemperaturowy

Ze względu na istotne różnice w wytrzymałościach złączy wykonywanych różnymi stopami (wniosek 1), podobnie jak przy ocenie stabilności rezystancji złączy (rozdział 6.3), analizę przeprowadzono oddzielnie dla grupy stopów SAC A, SAC B i SN100C, oraz pozostałych.

Dla pierwszej grupy stopów przyjęto następujące czynniki i ich poziomy:

- stop lutowniczy (czynnik A): SAC A (A1), SAC B (A2), SN100C (A3),
- skład powłoki pola lutowniczego (czynnik B): ImSn (B1), ENIG (B2), HASL (B3),
- czas wygrzewania (czynnik C): 0 godzin (C1), 300 godzin (C2), 600 godzin (C3).

Podobne czynniki i poziomy przyjęto dla drugiej grupy stopów, a mianowicie:

- stop lutowniczy (czynnik A): Bi w "powietrzu" (A1), Bi (A2), ołowiony (A3),
- powłoka ochronna (czynnik B): ImSn (B1), ENIG (B2), HASL (B3),
- czas starzenia (czynnik C): 0 godzin (C1), 300 godzin (C2), 600 godzin (C3).

Każdą analizę przeprowadzono w oparciu o wyniki 108 obserwacji (tzn. 4 obserwacje sił ścinania połączenia dla każdego testu tabeli ortogonalnej L27). Rezultaty przeprowadzonych analiz wariancji w postaci procentowego wpływu poszczególnych czynników i ich interakcji na wytrzymałość mechaniczną złączy zamieszczono w tabelach 7.1 i 7.2.

	SS Suma kwadratów	v Stopnie swobody	V wariancja	F Współczynnik	SS' Wartość oczekiwana	P Udział procentowy
A	1483	2	742	72,31***	1463	38
B	146	2	73	7,12***	126	3
C	53	2	27	2,59*	33	1
AxB	396	4	99	9,64***	355	9
AxC	511	4	128	12,46***	470	12
BxC	168	4	42	4,10***	127	3
AxBxC	258	8	32	3,15***	176	5
e (błąd)	831	81	10		1097	29
suma	3846	107				100

Tabela 7.1: Procentowy wpływ poszczególnych czynników i ich interakcji na wytrzymałość mechaniczną złączy (pierwsza grupa stopów) F-test: *** - 99% poziom ufności, * - 90% poziom ufności

	SS Suma kwadratów	v Stopnie swobody	V wariancja	F Współczynnik	SS' Wartość oczekiwana	P Udział procentowy
A	1397	2	699	15,60***	1308	7
B	200	2	100			
C	9130	2	4565	101,95***	9041	46
AxB	250	4	62			
AxC	906	4	227	5,06***	727	4
BxC	1073	4	268	5,99***	893	4
AxBxC	3163	8	395	8,83***	2805	14
e (błąd)	3627	81	45		4791	24
suma	19747	107				100
e_{pooled}	4077	87	207		4972	25

Tabela 7.2: Procentowy wpływ poszczególnych czynników i ich interakcji na wytrzymałość mechaniczną złączy (druga grupa stopów) F-test: *** - 99% poziom ufności

Wyniki pomiarów i analiz zamieszczone w tabelach 7.1 i 7.2 wykazują że:

1. Przy stosowaniu stopów lutowniczych o podobnym składzie i temperaturze topnienia (grupa pierwsza stopów) na wytrzymałość mechaniczną złączy nie mają wpływu rodzaje powłok lutowniczych ani czas starzenia. Analiza wariancji wskazuje, że

znaczenie ma rodzaj stopu lutowniczego (czynnik A). Jednak analiza wyników pomiarowych ujawnia, że średnie wartości sił ścinania złącza zmieniają się w wąskim zakresie 26,5 – 31 N przy zmianach czynnika A.

2. Dla drugiej grupy stopów lutowniczych wpływ rodzaju stopu (i jego temperatury topnienia) ma stosunkowo mały wpływ (7%) na wytrzymałość mechaniczną złącza. Bardziej istotne znaczenie ma czas starzenia. W tym przypadku zaobserwowano spadek średniej siły ścinania złącza od 41,5 N, dla złączy bezpośrednio po lutowaniu, do 31 N po 600 godzinach starzenia. Czynniki B oraz C są nieistotne i ich suma kwadratów została dodana do sumy kwadratów błęd (e_{pooled}).
3. Procentowy udział błęd obu analiz jest stosunkowo duży, co może oznaczać, iż istotne czynniki wpływające na wytrzymałość mechaniczną złączy lutowanych zostały pominięte podczas badań lub warunki prowadzenia testów nie były w pełni kontrolowane.

Ostatni wniosek istotnie ogranicza poziom ufności wniosków analizy wariancji. Wydaje się, że wcześniejsze założenie identyczności powierzchni S złączy oraz centralnego (w stosunku do złączy) przyłożenia siły ścinającej mogły nie być spełnione. Wskazują na to znaczne rozrzuty wyników pomiarów siły powodującej destrukcję złączy wykonanych dla tych samych kombinacji poziomów czynników. Dla ograniczenia dużego rozrzutu, dla każdego testu mierzono siłę ścinania 10 połączeń i trzy skrajne wartości odrzucano.

Wobec istotnych błędów metody wykazanie wpływu faz międzymetalicznych na wytrzymałość mechaniczną złączy przez bezpośrednie badanie siły ścinającej nie jest jednoznaczne. Niezbędne są badania niezawodności złączy lutowanych.

8 Niezawodność złączy lutowanych

Przez niezawodność złącza rozumie się jego cechę określającą zdolność do spełniania poprawnie wszystkich wymagań funkcjonalnych (połączenie mechaniczne, przewodność elektryczna i cieplna) przez założony czas, pod działaniem określonych czynników eksploatacyjnych i narażeniowych. Niezawodność może być określona rozkładem częstości występowania uszkodzeń, które nie spełniają wymagań funkcjonalnych, w funkcji czasu lub przez wyniki prób sprawdzających działanie złącza pod wpływem czynników wymuszających, występujących podczas eksploatacji [90].

8.1 Przyspieszone testy niezawodności złączy lutowanych

Testy niezawodności mogą być prowadzone w celu:

- przeprowadzenia analizy porównawczej badanych obiektów,
- oszacowania długości cyklu życia obiektu w normalnych warunkach użytkowania,
- przyspieszenia działania mechanizmów degradujących obiekt.

W zależności od czasu trwania testy niezawodności można podzielić na długoterminowe, średnioterminowe, krótkoterminowe oraz przyspieszone. Kryterium wyboru testu stanowi

obiekt badań oraz ograniczenia czasowe, finansowe i sprzętowe.

Długoterminowe testy trwają od kilku do kilkunastu lat. Przykładem długoterminowego testu jest przechowywanie badanych złączy w temperaturze pokojowej. Średnioterminowe testy trwają od kilku do kilkunastu miesięcy. Do średnioterminowych testów można zaliczyć przechowywanie badanych złączy w warunkach podwyższonej temperatury (wygrzewanie) lub wilgotności. Wygrzewanie w piecu w warunkach obniżonej wilgotności może trwać kilka miesięcy. Wygrzewanie przyspiesza utlenianie powierzchni złączy oraz rozrost faz międzymetalicznych w złączach. Wytyczne dotyczące wygrzewania oraz wypalania zawarte są w normie Mil-Std-883 Method 1008 [91].

Krótkotrwałe testy niezawodności trwają przeciętnie od kilku do kilkunastu tygodni. Złącza mogą być poddawane narażeniom środowiskowym np. szokom termicznym, cyklom temperaturowym lub narażeniom mechanicznym takim jak np. wibracje, udary mechaniczne. Ze względu na konkurencyjność i krótki czas wprowadzania produktu finalnego na rynek, obniżenie kosztu opracowania produktu, a nawet obniżenie kosztów gwarancyjnych, krótkotrwałe testy są stosowane najchętniej do oceny niezawodności złączy w montażu elektronicznym.

Szoki termiczne są bardzo rygorystycznymi testami. Podczas tych testów temperatura złączy ulega gwałtownym zmianom w szerokim spektrum temperatury. W okresie kilkudziesięciu sekund temperatura złączy może ulec zmianie o kilkadziesiąt lub więcej stopni kiedy pojemnik z testowanymi elementami przemieszcza się z komory gorącej (np. o temperaturze wyższej niż 100°C) do komory zimnej (np. o temperaturze niższej niż 0°C). Skutkiem niedopasowania współczynników rozszerzalności termicznej łączonych materiałów są naprężenia w obszarze złączy. Wielokrotne szokowe zmiany temperatur i wynikające stąd zmienne naprężenia mechaniczne powodują efekty zmęczeniowe i mogą prowadzić do degradacji złączy. Wytyczne dotyczące poddawania obiektów badań szokom termicznym zawarte są w normie Mil-Std-883 Method 1011 [92] oraz w normie JEDEC JESD22-A106 [93]. Mniej agresywnymi przyspieszonymi testami są cykle temperaturowe. Gradient temperatury w przypadku cykli temperaturowych wynosi przeciętnie kilka stopni na minutę (np. $\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$) i jest znacznie mniejszy niż w przypadku szoków termicznych. Wytyczne dotyczące cykli temperaturowych zawarte są w normie Mil-Std-883 Method 1010 [94] oraz w normie JEDEC JESD22-A104 [95].

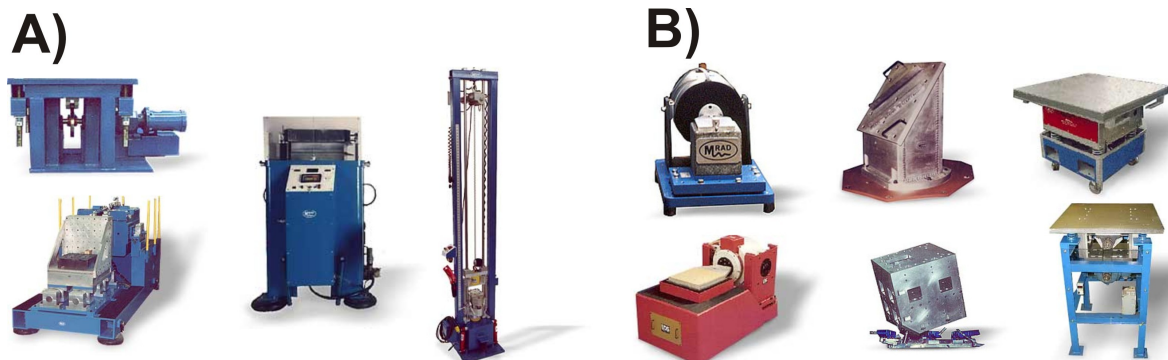
Liczba cykli szoków termicznych oraz cykli temperaturowych zazwyczaj mieści się w

przedziale od kilkuset do kilku tysięcy. Szoki termiczne i cykle temperaturowe mogą powodować różnego typu uszkodzenia, takie jak pęknięcia złączy, podłoży, obudów elementów oraz przewodów. Dlatego też po przeprowadzeniu testów niezawodności płytek obwodów drukowanych, wizualnej inspekcji poddaje się nie tylko złącza, ale także obudowy, wyprowadzenia, uszczelnienia oraz czasami przeprowadza się dodatkowo testy funkcjonalne badanych podzespołów.

W przypadku poddawania złączy wibracjom, w zależności od symulowanych warunków pracy urządzeń, jako pobudzenia drgań stosuje się sygnały sinusoidalne lub szum. Drgania sinusoidalne symulują okresowe narażenia, których źródłem mogą być urządzenia poruszające się ruchem postępowo-zwrotnym lub obrotowym, np. wentylatory, silniki. Drgania losowe, uzyskane w wyniku pobudzenia szumem, symulują losowe, chwilowe narażenia wywołane np. użytkowaniem lub transportem. W praktyce jako pobudzenie drgań losowych stosuje się wycinek widma szumu białego, np. szum o częstotliwościach z zakresu 50-500 Hz. Szum biały jest to szum, którego energia nie zależy od częstotliwości. Parametrem opisującym energię drgań losowych jest gęstość widmowa szumu białego (PSD - ang. Power Spectral Density).

Podczas testów wibracyjnych maksymalne chwilowe przyspieszenie mierzone na powierzchni badanych płytek obwodów drukowanych nie przekracza kilkudziesięciu g ($1\text{ g} = 9,8\text{ m/s}^2$). Istotą testów jest ocena odporności badanych złączy na drgania o stałej amplitudzie (lub stałym PSD) z określonego zakresu częstotliwości lub częstotliwości zmiennych w szerokim zakresie. Wytyczne dotyczące testów wibracyjnych o stałej częstotliwości (VFT – ang. Vibration Fatigue Test) i zmiennej częstotliwości (VFVT – ang. Variable Frequency Vibration Test) zawarte są w normach Mil-Std-933 Method 2005 [96] i Mil-Std-933 Method 2007 [97].

W testach udarów mechanicznych badane płytki obwodów drukowanych poddawane są przeciążeniom osiągającym wartość kilkudziesięciu tysięcy g. Średni czas impulsu trwa od 0,1 do 1 milisekundy. Udary mechaniczne (w praktyce upadki na twarde podłoże) mogą spowodować pogorszenie parametrów funkcjonalnych urządzenia lub jego całkowite uszkodzenie. Wytyczne dotyczące udarów mechanicznych zawarte są w normie Mil-Std-833 Method 2002 [98]. Przykłady konstrukcji urządzeń testów udarów mechanicznych oraz wibracji pokazano na rysunku 8.1.



Rysunek 8.1: Różne konstrukcje urządzeń używanych do poddawania badanych obiektów: A) uderom mechanicznym, B) wibracjom [99]

Wspólną cechą krótkotrwałych testów niezawodności jest poddawanie badanych elementów w krótkim czasie seriom narażeń, które w normalnej eksploatacji trwają wielokrotnie dłużej. Z tego względu używa się powszechnie określenia „przyspieszone testy niezawodności”. Określenie to obejmuje także testy, podczas których złącza poddaje się działaniu jednocześnie kilku narażeń. Przyspieszone testy niezawodności trwają przeważnie od kilku godzin do kilkudziesięciu dni. Przykładem przyspieszonego testu niezawodności złączy lutowanych jest poddawanie złączy wibracjom w warunkach cyklicznie zmieniającej się temperatury. W ten sposób badane złącza poddaje się większym obciążeniom, przyspieszając tym samym efekt zmęzeniowy złączy i znacznie skracając oczekiwany czas do wystąpienia uszkodzeń [100].

Innymi stosowanymi testami niezawodności podzespołów elektronicznych są:

- testy THB (ang. Temperature Humidity Bias) polegające na poddawaniu układów polaryzacji w warunkach podwyższonej temperatury (85°C) oraz wilgotności (85% RH),
- testy HTOL (ang. High Temperature Operating Life) polegające na pracy układów w warunkach podwyższonej temperatury,
- testy LTOL (ang. Low Temperature Operating Life) polegające na pracy układów w warunkach obniżonej temperatury,
- testy SHRT (ang. Solder Heat Resistance Test), których celem jest określenie odporności badanych układów na procesy lutowania.

Przeciętny test THB trwa około 1000 godzin. Agresywną odmianą testu THB jest test HAST (ang. Highly Accelerated Stress Test) przeprowadzany w wyższej temperaturze (130°C) niż test THB. Przeciętny test HAST trwa 96-100 godzin. Oba testy przyspieszają

proces korozji.

Test HTOL przeprowadza się przeważnie w temperaturze 125°C przez około 1000 godzin. Test można przyspieszyć podwyższając temperaturę. Test LTOL przeprowadza się w temperaturze -10°C. Oba testy są testami zmęczeniowymi i mają na celu przyspieszenie naturalnego procesu zużycia. Wytyczne dotyczące obu testów zawarte są w normie Mil-Std-833 Method 1005 [101] oraz w normie JEDEC JESD22-A108 [102].

Testy SHRT stosuje się przed przystąpieniem do innych testów np. testów THB, HAST, szoków termicznych, cykli temperaturowych. Podczas testu SHRT próbki poddaje kolejno następującym procesom:

- wygrzewaniu w temperaturze 125°C przez 24 godziny,
- przechowywaniu w warunkach podwyższonej temperatury oraz wilgotności, do momentu wystąpienia na powierzchni płytek kontrolowanej ilości rosy,
- szokem termicznym symulującym proces lutowania.

8.2 Współczynnik przyspieszenia efektu zmęczenia złączy lutowanych

Wyznacznikiem efektywności testu niezawodności jest współczynnik przyspieszenia AF (ang. Acceleration Factor), którego wartość zależy zarówno od rodzaju i poziomu narażeń jak i obiektu badań. Współczynnik AF jest opisany zależnością:

$$AF = \frac{N_{FIELD}}{N_{TEST}} \quad , \quad (8.1)$$

w którym:

- N_{FIELD} – liczba cykli do wystąpienia uszkodzenia w normalnych warunkach użytkowania,
- N_{TEST} - liczba cykli do wystąpienia uszkodzenia w warunkach przyspieszonego testu niezawodności.

Znajomość wartości współczynnika AF prowadzonych testów umożliwia oszacowanie czasu bezawaryjnej pracy obiektu w warunkach normalnego użytkowania oraz przeprowadzenie analiz porównawczych różnych testów niezawodności. Wartość współczynnika AF można określić empirycznie lub oszacować analizując model uszkodzenia złącza lutowanego. Wieloletnie badania prowadzone w światowych laboratoriach poświęcone niezawodności złączy lutowanych stopami zawierającymi ołów zaowocowały wieloma

empirycznymi oraz numerycznymi modelami uszkodzeń. Jednymi z pierwszych modeli, które opracowano były modele Coffina-Mansona [103] oraz Norrisa-Landzberga [104]. Mimo upływu kilkudziesięciu lat od ich opublikowania, oba modele oraz ich liczne modyfikacje są nadal z powodzeniem stosowane.

Wprowadzenie bezołowiowych stopów lutowniczych wymusiło dopasowanie opracowanych modeli uszkodzeń do nowych materiałów. Zazwyczaj nowe wartości parametrów modeli określano empirycznie na podstawie testów niezawodności. Zalecane do celów badawczych modele uszkodzeń złączy lutowanych stopami bezołowiowymi zebrano w zaktualizowanym załączniku B do normy IPC-9701A [105]. W załączniku wyszczególniono trzy analityczne modele, model jednowymiarowy oparty na energii naprężeń (1-D strain-energy based) opracowany przez Clecha [106] oraz sześć modeli numerycznych opracowanych w oparciu o metodę elementów skończonych (model Che [107], Guedona [108], Ng [109], Schuberta [110], Syeda [111] oraz Zhanga [112]).

Wśród analitycznych modeli opisanych w załączniku znalazł się model opracowany przez Pana [113], stanowiący modyfikację równania Norrisa-Landzberga pierwotnie opisującego stopy ołowiowe [104], model Salmela [114], [115] stanowiący modyfikację modelu Engelmaiera [116] oraz model Lalla [117] oparty zarówno na metodach statystycznych, jak również na istniejących modelach procesu zmęczenia złączy lutowanych.

Podczas testów niezawodności prowadzonych na potrzeby rozprawy doktorskiej, złącza lutowane poddawane były wibracjom w warunkach cyklicznie zmieniającej się temperatury. W celu oszacowania wartości współczynnika AF wynikającego jedynie z cykli temperaturowych, wykorzystano zawarty w normie, zmodyfikowany model Norrisa-Ladzberga uszkodzeń złączy lutowanych stopem z rodziny trójskładnikowych stopów SnAgCu (nazywanych również skrótowo SAC) opisany równaniem [113], [118], [114]:

$$AF = \frac{N_{FIELD}(x)}{N_{TEST}(x)} = \left(\frac{\Delta T_{TEST}}{\Delta T_{FIELD}} \right)^{2,65} \left(\frac{t_{TEST}}{t_{FIELD}} \right)^{0,135} \exp \left[2185 \left(\frac{1}{T_{FIELD}} - \frac{1}{T_{TEST}} \right) \right], \quad (8.2)$$

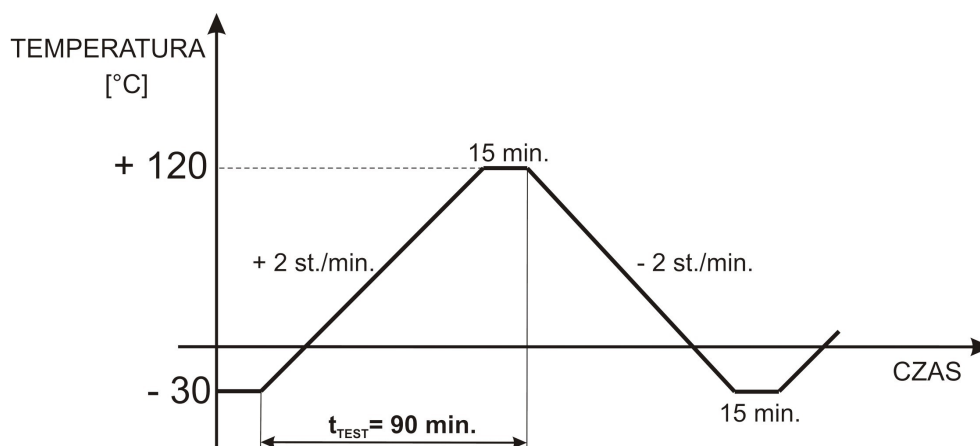
w którym:

- $N_{FIELD}(x)$ - liczba cykli do wystąpienia uszkodzenia x procent łańcuchów złączy w normalnych warunkach użytkowania,
- $N_{TEST}(x)$ - liczba cykli do wystąpienia uszkodzenia x procent łańcuchów złączy w warunkach przyspieszonego testu niezawodności,
- t_{FIELD} - suma czasu narostu temperatury oraz czasu przechowywania w maksymalnej

temperaturze w normalnych warunkach użytkowania,

- t_{TEST} - suma czasu narostu temperatury oraz czasu przechowywania w maksymalnej temperaturze w warunkach przyspieszonego testu niezawodności,
- T_{FIELD} - maksymalna temperatura (wyrażona w kelwinach) w normalnych warunkach użytkowania,
- T_{TEST} - maksymalna temperatura (wyrażona w kelwinach) w warunkach przyspieszonego testu niezawodności.

Podczas testu niezawodności temperatura w komorze klimatycznej zmieniała się cyklicznie zgodnie z wykresem zaprezentowanym na rysunku 8.2. Maksymalna temperatura T_{TEST} wyniosła 120°C (393 K), suma t_{TEST} czasu narostu temperatury (od temperatury -30°C do temperatury 120°C) oraz czasu przechowywania w temperaturze 120°C wyniosła 90 minut.



Rysunek 8.2: Pojedynczy cykl temperaturowy

Skrajne wartości temperatury (20°C oraz 55°C), sumę czasu narostu i czasu przechowywania t_{FIELD} (12 godzin) oraz maksymalną temperaturę wyrażoną w kelwinach T_{FIELD} (328 K) cykli temperaturowych w normalnych warunkach użytkowania określono na podstawie przykładowych warunków pracy produktów konsumenckich opisanych w normie IPC-SM-785 [24].

Po podstawieniu parametrów do zmodyfikowanego równania Norrisa-Ladzberga uzyskano następującą wartość współczynnika AF:

$$AF = \frac{N_{FIELD}(x)}{N_{TEST}(x)} = \left(\frac{150 K}{35 K}\right)^{2,65} \left(\frac{1,5 h}{12 h}\right)^{0,135} \exp\left[2185\left(\frac{1}{328 K} - \frac{1}{393 K}\right)\right] = 107 \quad (8.3)$$

Na podstawie obliczonej wartości współczynnika AF można stwierdzić, iż zmęczenie złączy lutowanych stopem SAC podczas testu niezawodności wywołane jednym pełnym

cyklem temperaturowym odpowiada zmęczeniu wywołanemu użytkowaniem przez 107 dni zgodnie z warunkami opisanymi w normie. Sześciodniowy test (48 cykli temperaturowych) odpowiada 13 latom użytkowania.

Znając wartość współczynnika AF można wyliczyć współczynnik CM uproszczonego modelu Coffina-Mansona uszkodzeń złączy lutowanych opisanego następującym wzorem:

$$AF = \frac{N_{FIELD}(x)}{N_{TEST}(x)} = \left(\frac{\Delta T_{TEST}}{\Delta T_{FIELD}} \right)^{CM} \quad (8.4)$$

Dla złączy lutowanych stopem SnPb współczynnik CM jest równy 1,9 [114]. W przypadku stopów bezołowiowych SnAgCu współczynnik CM można obliczyć na podstawie modelu Norrisa-Landzberga. Znając wartość współczynnika AF (model Norrisa-Landzberga), wartość współczynnika CM złączy lutowanych stopem bezołowiowym SnAgCu można obliczyć z zależności:

$$CM = \log \left(\frac{\Delta T_{TEST}}{\Delta T_{FIELD}} \right)^{AF} = \log \left(\frac{150K}{35K} \right)^{107} = 3,21 \quad (8.5)$$

Obliczona wartość współczynnika CM jest zbliżona do wartości współczynników CM określonych eksperymentalnie w ramach prac prowadzonych przez Instytut Fraunhofera z Berlina i z Chemnitz [119]. Wartości współczynników CM określonych na podstawie badań eksperymentalnych zawierają się w przedziale 2,95-3,92 [120], [118]. Oba szczegółowo przedstawione modele można z powodzeniem stosować zarówno podczas planowania testów niezawodności złączy lutowanych stopami SnAgCu jak i interpretacji rezultatów przeprowadzonych badań.

W przypadku testów niezawodności, podczas których złącza lutowane poddawane są losowym wibracjom, współczynnik AF można obliczyć korzystając z następującego równania, opisanego w normie IPC-SM-785 [24]:

$$AF = \frac{t_{FIELD}}{t_{TEST}} = \left[\frac{PSD_{TEST}}{PSD_{FIELD}} \right]^M \quad (8.6)$$

w którym:

- t_{FIELD} - czas użytkowania w warunkach normalnych, podczas którego badane złącza poddawane są wibracjom o gęstości widmowej mocy drgań równej PSD_{FIELD} [g^2/Hz] (ang. Power Spectral Density),
- t_{TEST} - czas trwania testu wibracyjnego w warunkach laboratoryjnych, podczas którego badane złącza poddawane są wibracjom o gęstości widmowej mocy drgań równej

$\text{PSD}_{\text{TEST}} [\text{g}^2/\text{Hz}]$,

- M - współczynnik materiałowy, którego wartość dla złączy lutowanych zawiera się w przedziale od 3 do 4 [24].

Podczas prowadzonych testów gęstość widmowa mocy wibracji losowych wzbudnika wynosiła $\text{PSD}_{\text{TEST}} = 0,013 \text{ g}^2/\text{Hz}$. W celu oszacowania współczynnika AF wynikającego jedynie z wibracji przyjęto, że podczas użytkowania w normalnych warunkach złącza lutowane poddawane są wibracjom losowym o gęstości widmowej mocy równej $\text{PSD}_{\text{FIELD}} = 0,002 \text{ g}^2/\text{Hz}$. Przyjmując minimalną wartość współczynnika $M = 3$, wartość współczynnika AF osiąga wartość 1100. Oznacza to, że podczas sześciu dni testu wibracji poziom skumulowanych uszkodzeń zmęczeniowych w złączach osiąga poziom uszkodzeń skumulowanych przez 18 lat użytkowania [121], [122].

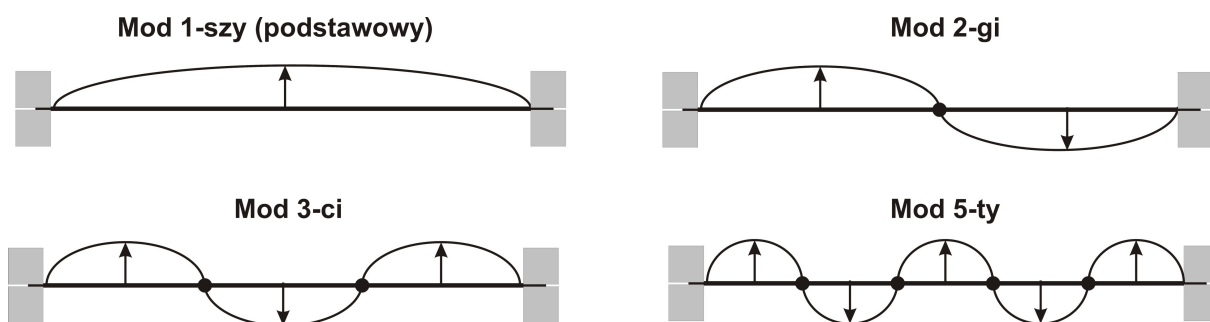
W literaturze światowej brak jest wiarygodnych analiz dotyczących wartości współczynnika AF dla połączonych narażeń temperaturowych i wibracji jakim poddawane są złącza lutowane stopami bezołowiowymi. Nie jest to także celem niniejszej pracy. Nie ulega jednak wątpliwości, że jest to jeden z najbardziej skutecznych testów przyspieszonych, w którym kilkudniowe badanie odpowiada wieloletniemu użytkowaniu zespołów w warunkach normalnych.

8.3 Częstotliwość rezonansowa oraz odkształcenia płytek obwodów drukowanych poddawanych wibracjom

Płytki obwodów drukowanych poddawane wibracjom ulegają odkształceniom. Wielkość tych odkształceń jest zależna od energii drgań wzbudnika, materiału użytego do produkcji płytek, temperatury, konstrukcji uchwytów mocujących płytkę, sposobu rozmieszczenia i wagi zamontowanych elementów, rodzaju wibracji (losowe, harmoniczne) a także od częstotliwości rezonansowej płytki. Im wyższa częstotliwość rezonansowa, tym mniejszym odkształceniom i naprężeniom ulega płytka [123].

8.3.1 Mody odkształceń, rozkład Gaussa drgań losowych

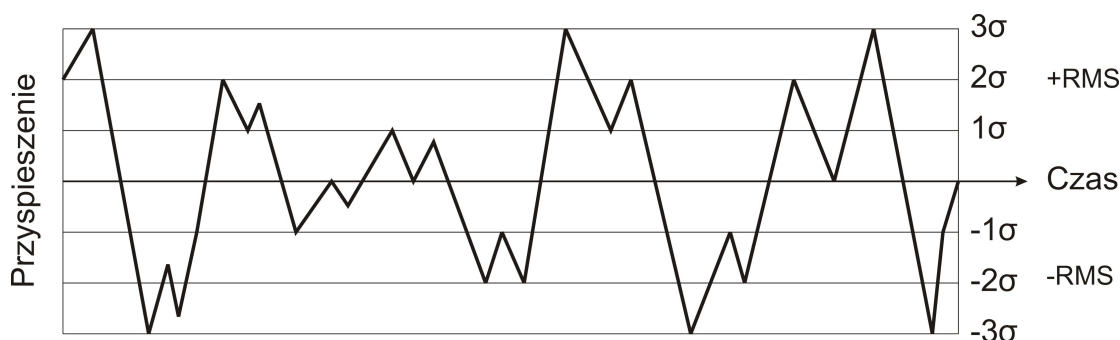
Badania wykazały, że zamocowane płytki obwodów drukowanych mogą być analizowane jako systemy o jednym stopniu swobody [123]. Podstawowe mody odkształceń płytki, w których rozchodzi się fala stojąca mogą być takie, jak pokazane na rysunku 8.3. Każdy mod charakteryzuje się obecnością miejsc, w których amplituda drgań jest równa zero (węzły) oraz miejsc, w których amplituda drgań jest maksymalna (strzałki).



Rysunek 8.3: Mody odkształceń płytki obwodów drukowanych poddawanej wibracjom

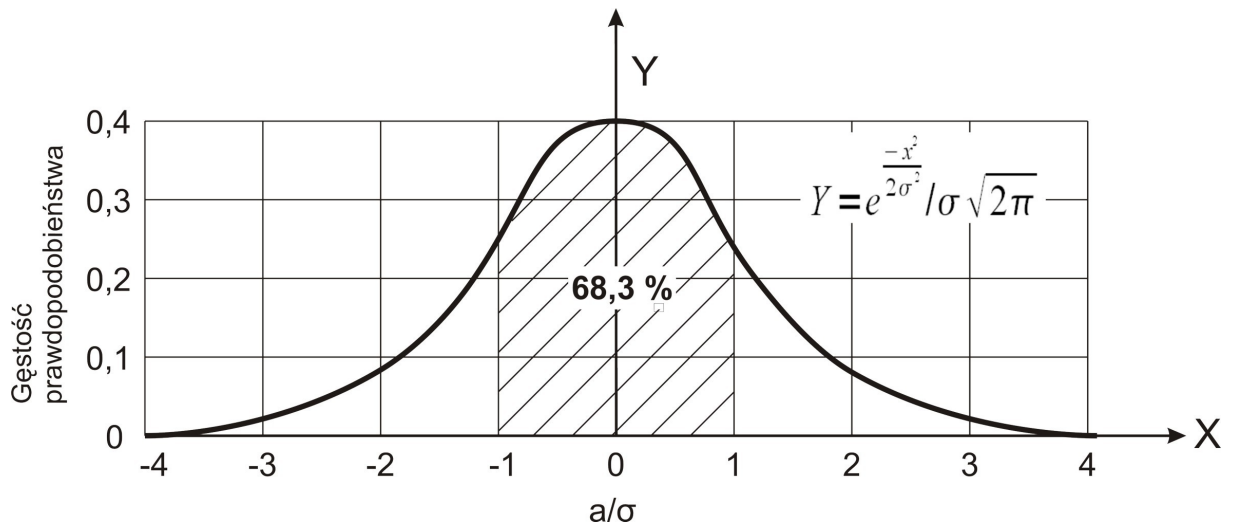
Podczas prowadzonych testów niezawodności złączy lutowanych, płytki obwodów drukowanych poddawano wibracjom losowym, ponieważ złącza poddawane tego typu wibracjom szybciej ulegają zmianom zmęczeniowym, niż złącza poddawane wibracjom harmonicznym. Zakres częstotliwości drgań losowych powinien obejmować częstotliwość rezonansową płytki, która w większości przypadków mieści się w zakresie 100-400 Hz [123] i z tego względu częstotliwości drgań losowych stosowanych w diagnostyce sprzętu elektrycznego i elektronicznego obejmuje zakres 50-500 Hz.

Do przeprowadzenia testów wykorzystano elektrodynamiczny wzbudnik drgań pobudzany szumem białym o częstotliwości z zakresu 50-500 Hz. Przykładowy wykres wartości chwilowej przyspieszenia głowicy wzbudnika podczas wibracji losowych pokazano na rysunku 8.4. Wartość skuteczną RMS (ang. Root Mean Square) przyspieszenia oznaczono jako 1σ ($3\sigma = 3 \cdot 1\sigma$).



Rysunek 8.4: Wartość chwilowa przyspieszenia wibrującej głowicy wzbudnika

Rozkład Gaussa $Y = e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} / \sigma \sqrt{2\pi}$ określający prawdopodobieństwo chwilowej wartości przyspieszenia w dowolnym momencie testu pokazano na rysunku 8.5.



Rysunek 8.5: Krzywa rozkładu Gaussa

Zgodnie z krzywą rozkładu, przez 68,3% czasu trwania testu chwilowa wartość przyspieszenia głowicy wzbudnika zawiera się w przedziale wartości -1σ i $+1\sigma$. Przez 95,4% oraz 99,73% chwilowa wartość przyspieszenia zawiera się odpowiednio w przedziale -2σ i $+2\sigma$ oraz -3σ i $+3\sigma$. Przez 0,27% czasu trwania testu chwilowa wartość przyspieszenia głowicy wzbudnika jest większa niż trzykrotna wartość przyspieszenia skutecznego 3σ .

8.3.2 Częstotliwość rezonansowa płytek testowych

Testowe płytki obwodów drukowanych mają kształt kwadratu o boku 150 mm. Częstotliwość drgań własnych płytek zależy od sposobu mocowania ich krawędzi (zamocowana, niezamocowana). Podczas prowadzonych testów niezawodności płytki zamocowane były wzdłuż dwóch przeciwległych krawędzi, pozostałe dwie krawędzie pozostały niezamocowane. Częstotliwość rezonansową f_n płytki zamocowanej w ten sposób można oszacować korzystając z równania Steinberga [123]:

$$f_n = \frac{3,55}{a^2} \left(\frac{D}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (8.7)$$

przy czym współczynnik sztywności D określony jest wzorem:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (8.8)$$

Dla rozpatrywanego przypadku wartości parametrów występujących w równaniach (8.7) oraz (8.8) są następujące:

- $a=0,15$ m – długość krawędzi płytki,
- $b=0,12$ m – odległość między uchwytami,

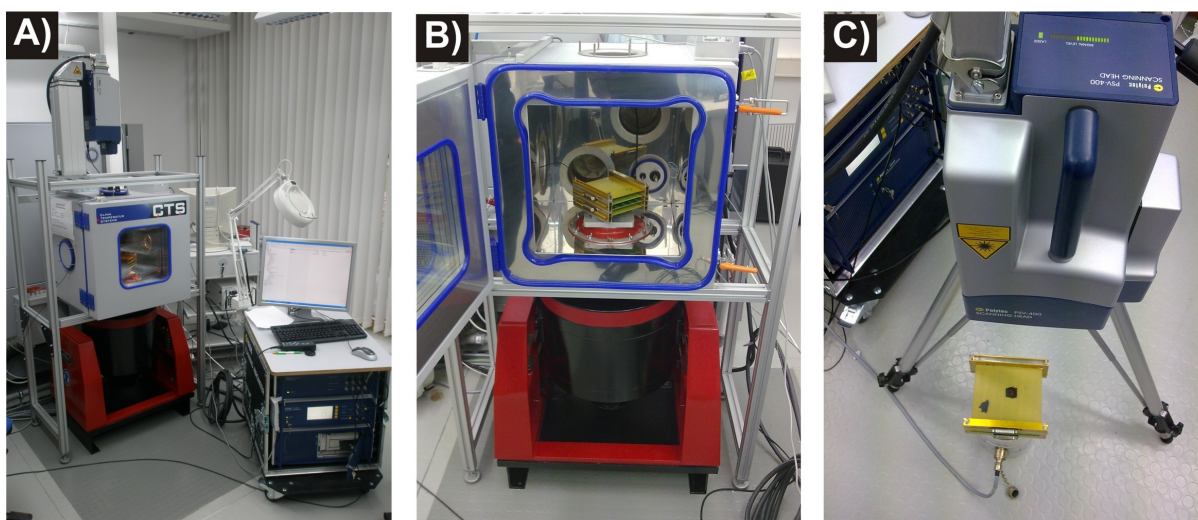
- $E=13,8 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ – moduł sprężystości laminatu epoksydowo-szklanego FR4,
- $h=0,0015 \text{ m}$ – grubość POD,
- $\nu=0,12$ – współczynnik Poissona laminatu epoksydowo-szklanego FR4,
- $\rho=3,33 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^3$ – gęstość masy płytki.

Częstotliwość rezonansowa płytek testowych obliczona na podstawie równania Steinberga (8.7) jest równa 267 Hz.

Równanie Steinberga, na podstawie którego oszacowano częstotliwość rezonansową płytki testowej, uwzględnia jej materiał, wymiary oraz sposób mocowania. Nie uwzględnia natomiast wzoru mozaiki przewodzącej oraz rozmieszczenia i wielkości elementów przylutowanych do jej powierzchni. W rzeczywistości oba nieuwzględnione czynniki testowanej płytki mogą istotnie wpływać na jej częstotliwość rezonansową, co wymusza przeprowadzenie weryfikacji obliczonej częstotliwości rezonansowej. W tym celu przeprowadzono dodatkowe badania eksperymentalne.

Częstotliwość rezonansową płytki testowej określono na podstawie pomiarów przyspieszenia w centralnym punkcie płytki poddawanej losowym wibracjom. Centralny punkt płytki stanowi strzałkę modu podstawowego oraz nieparzystych wyższych modów (rysunek 8.3). Dlatego amplituda przemieszczenia płytki w tym punkcie jest największa. Pomiary przyspieszenia przeprowadzono z użyciem skanującego wibrometru laserowego. W celu zwiększenia wiarygodności rezultatów badań jako źródło drgań użyto kolejno dwóch wzbudników różniących się masą, gabarytami i maksymalną obciążalnością. Dla rozróżnienia, wzbudniki te oznaczono jako PWr (wzbudnik Zakładu Technologii Aparatury Elektronicznej Politechniki Wrocławskiej) oraz IZM (wzbudnik Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Microintegration, Berlin).

Podczas pierwszego etapu badań przeprowadzono pomiar przyspieszenia płytki testowej zamocowanej w uchwycie przykręconym do małogabarytowego wzbudnika PWr (rysunek 8.6C), wykorzystywanego podczas prowadzonych testów niezawodności i sterowanego przy użyciu wzmacniacza akustycznego i komputera (rysunek 8.12). Podczas drugiego etapu badań przeprowadzono pomiar przyspieszenia płytki zamocowanej w uchwycie przykręconym do wielkogabarytowego wzbudnika IZM, zintegrowanego z komorą klimatyczną i sterowanego za pomocą dedykowanego systemu (rysunek 8.6B).

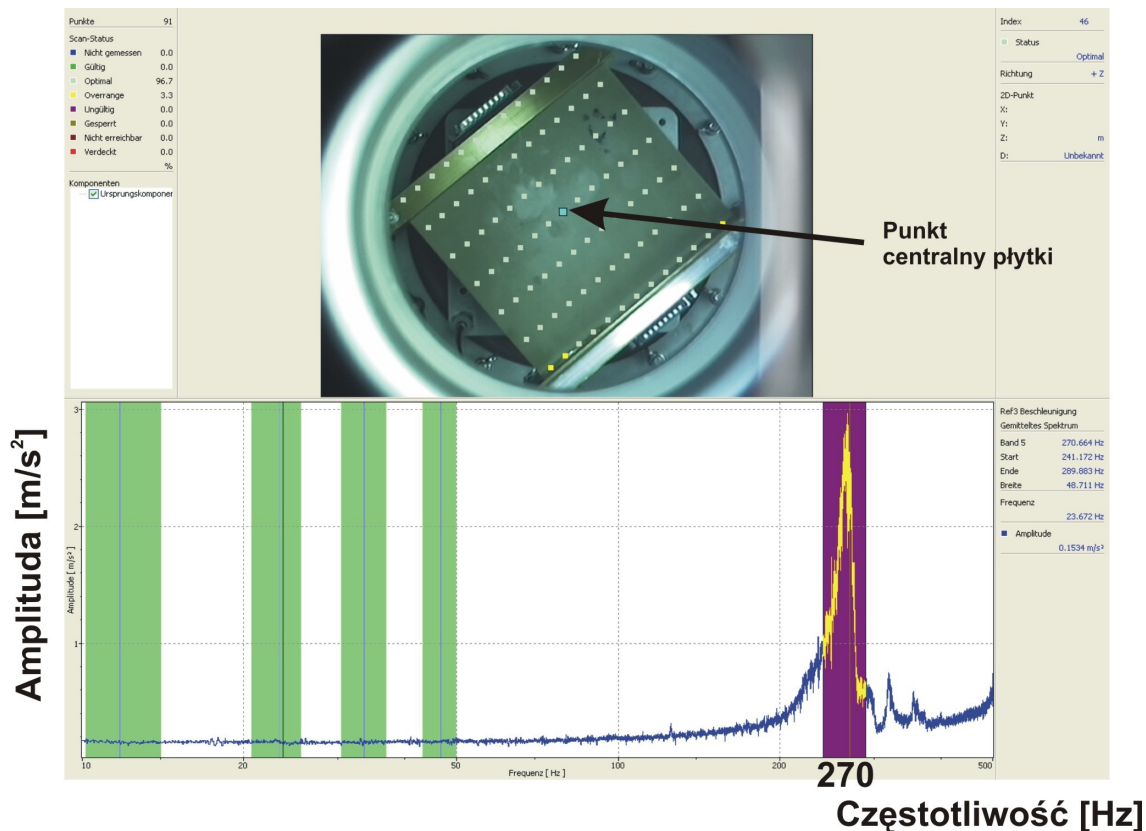


Rysunek 8.6: Badanie częstotliwości rezonansowej testowych płytek obwodów drukowanych: A) stanowisko badawcze laboratorium IZM, B) widok płytek zamontowanych na wzbudniku IZM, C) widok płytek zamontowanych na wzbudniku PWr

Na rysunku 8.7 pokazano płytkę testową podczas pomiarów przyspieszenia (uchwyt przykręcony do wzbudnika IZM) oraz rozkład widmowy przyspieszenia w jej centralnym punkcie. Na wykresie rozkładu widmowego zaznaczono częstotliwość rezonansową (270 Hz).

Różnica częstotliwości równa 3 Hz między częstotliwością rezonansową obliczoną na podstawie równania Steinberga (267 Hz), a częstotliwością rezonansową określoną na podstawie pomiarów (270 Hz) może wynikać z faktu, że równanie Steinberga opisuje częstotliwość rezonansową płytki nieobsadzonej elementami oraz nie uwzględnia wzoru mozaiki przewodzącej, podczas gdy pomiarom przyspieszenia poddawano płytki testowe jednostronnie metalizowane, obsadzone 20 elementami SMD 1206 oraz 20 elementami SMD 0805 (rysunek 8.11).

Mimo niewielkiej różnicy częstotliwości rezonansowych, przeprowadzone badania potwierdzają zgodność modelu płytki opisanego równaniem Steinberga z testową płytką obwodów drukowanych.



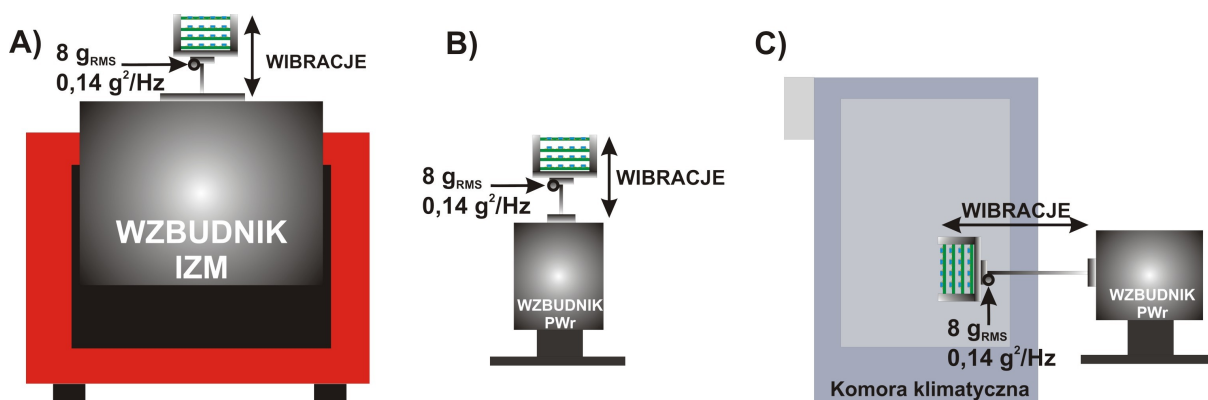
Rysunek 8.7: Widok płytki zamontowanej na wzbudniku IZM oraz wykres rozkładu widmowego przyspieszenia w centralnym punkcie płytki poddawanej wibracjom losowym (na zdjęciu widoczna jest spodnia część płytki, elementy zamontowane są na wierzchniej stronie płytki)

8.3.3 Odkształcenia płytek testowych poddawanych wibracjom

W rozdziale 8.3.1 przedstawiono schematycznie główne mody odkształceń płytki poddawanej wibracjom (rysunek 8.3). W celu określenia rzeczywistych odkształceń płytki testowej poddawanej wibracjom losowym podczas testu niezawodności zaplanowano przeprowadzenie pomiarów przyspieszenia i przemieszczenia wybranych punktów jej powierzchni przy użyciu skanującego wibrometru laserowego stanowiącego część stanowiska badawczego (rysunek 8.6A) użytego wcześniej do określenia częstotliwości rezonansowej płytek testowych.

Przed przystąpieniem do skanowania powierzchni płytki testowej przeprowadzono regulację gęstości widmowej mocy drgań wzbudnika IZM (rysunek 8.6B) stanowiącego integralną część stanowiska badawczego (rysunek 8.6A). Celem regulacji było uzyskanie gęstości widmowej mocy drgań u nasady uchwytu przykręconego do wzbudnika IZM (rysunek 8.8A) równej gęstości widmowej mocy drgań w tym samym miejscu uchwytu przykręconego do wzbudnika PWr (rysunek 8.8B) używanego podczas przeprowadzanych testów niezawodności złączy lutowanych (rysunek 8.8C). Procedurę regulacyjną przeprowadzono w temperaturze 20°C. Jako sygnału pobudzenia wzbudników użyto szumu

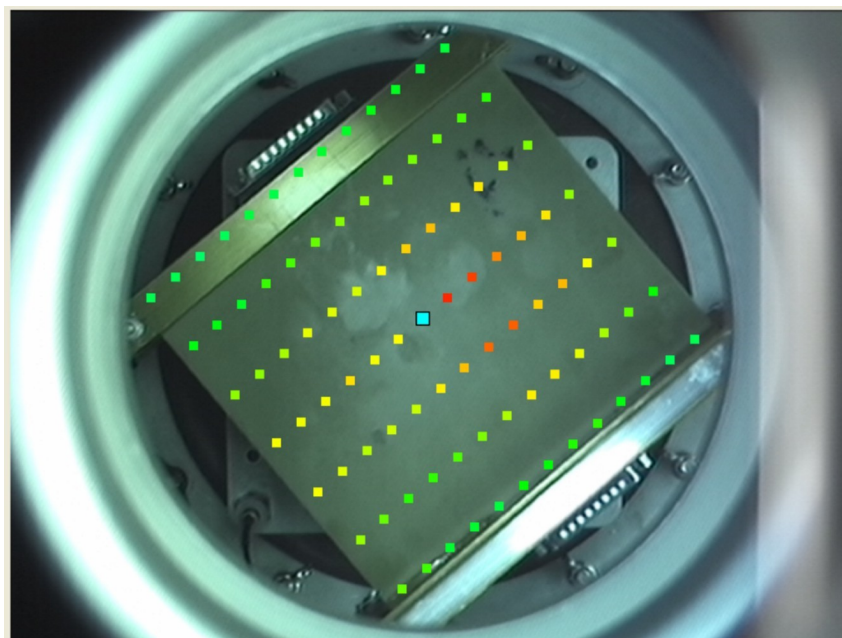
białego o częstotliwościach z zakresu 50-500 Hz.



Rysunek 8.8: Kalibracja wzbudników użytych do badania częstotliwości rezonansowej testowych płytek obwodów drukowanych, strzałkami zaznaczono punkty oceny gęstości widmowej mocy drgań: A) wzbudnik IZM z zamontowanym uchwytem, B) wzbudnik PWr z zamontowanym uchwytem, C) wzbudnik PWr z zamontowanym uchwytem podczas prowadzonych testów niezawodności

Przeprowadzona procedura regulacyjna zapewniła powtarzalność narażeń mechanicznych zarówno w testach wibracyjnych (pomiarów laserowym wibrometrem skanującym) jak i testach niezawodności.

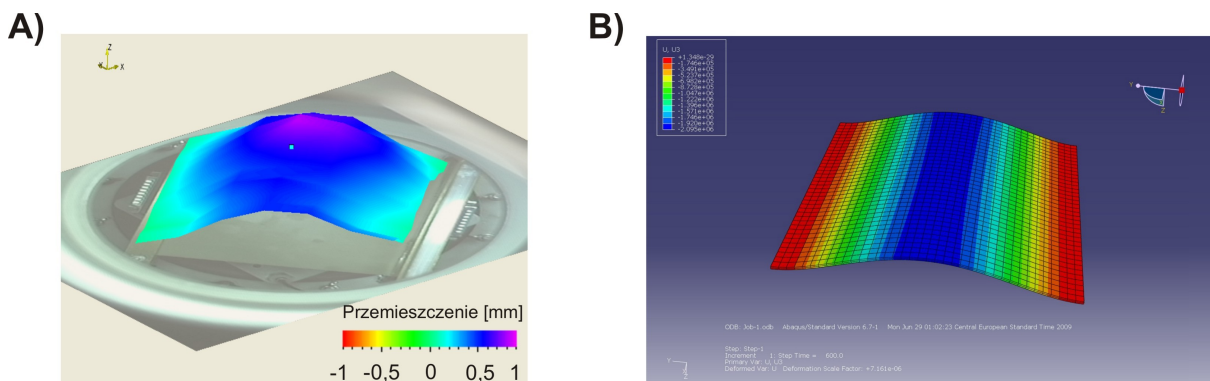
Podczas skanowania powierzchni płytki przeprowadzono pomiary przyspieszenia oraz przemieszczenia 71 wybranych punktów, które pokazano na rysunku 8.9.



Rysunek 8.9: Matryca punktów, których przyspieszenie było mierzone przez skanujący wibrometr laserowy

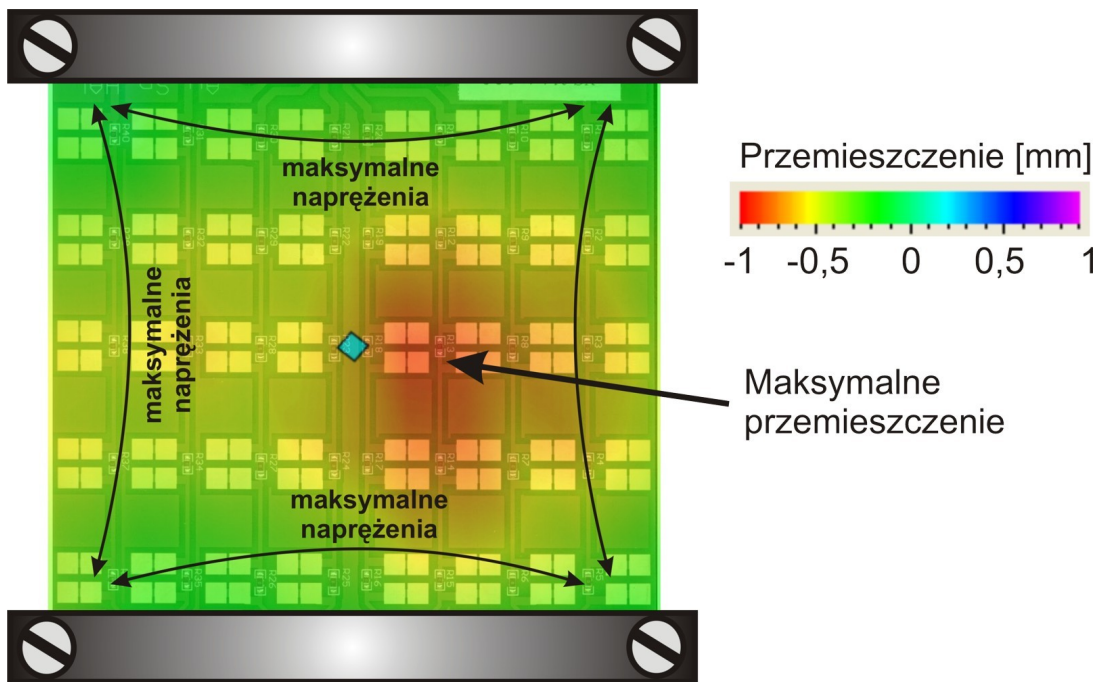
Zgodnie z procedurą pomiarową skanującego wibrometru laserowego, zapewniającą wysoką wiarygodność rezultatów pomiarów, przyspieszenie i przemieszczenie w każdym punkcie

zostało zmierzone wielokrotnie podczas każdej z trzech serii skanowania. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano animację płytki ulegającej odkształceniom wskutek wibracji, odzwierciedlającą rzeczywiste odkształcenia płytki podczas badań i prowadzonych testów niezawodności. Obraz animacji zatrzymanej podczas maksymalnego odkształcenia płytki przedstawiono na rysunku 8.10A.



Rysunek 8.10: Odkształcenie płytki poddanej wibracjom losowym w temperaturze 20°C: A) wynik pomiarów za pomocą skanującego wibrometru laserowego, B) symulacja numeryczna odkształcenia opracowana w pakiecie ABAQUS

Maksymalne przemieszczenie płytki w stosunku do stanu spoczynkowego wynoszące około 1 mm zarejestrowano w punkcie centralnym płytki (rysunek 8.10A oraz rysunek 8.11). Na rysunku 8.11 pokazano prawdopodobne miejsca występowania największych naprężeń wynikających z odkształcenia płytki podczas wibracji.



Rysunek 8.11: Lokalizacja największych naprężeń oraz rozkład przemieszczenia płytki testowej z przylutowanymi elementami podczas wibracji w temperaturze 20°C

Przeprowadzone w późniejszej fazie badań testy niezawodności złączy lutowanych wykazały, że złącza zlokalizowane w obszarach maksymalnych naprężeń znacznie szybciej ulegają uszkodzeniom zmęczeniowym niż złącza lutowane zlokalizowane w pozostałych miejscach. (rozdział 8.5).

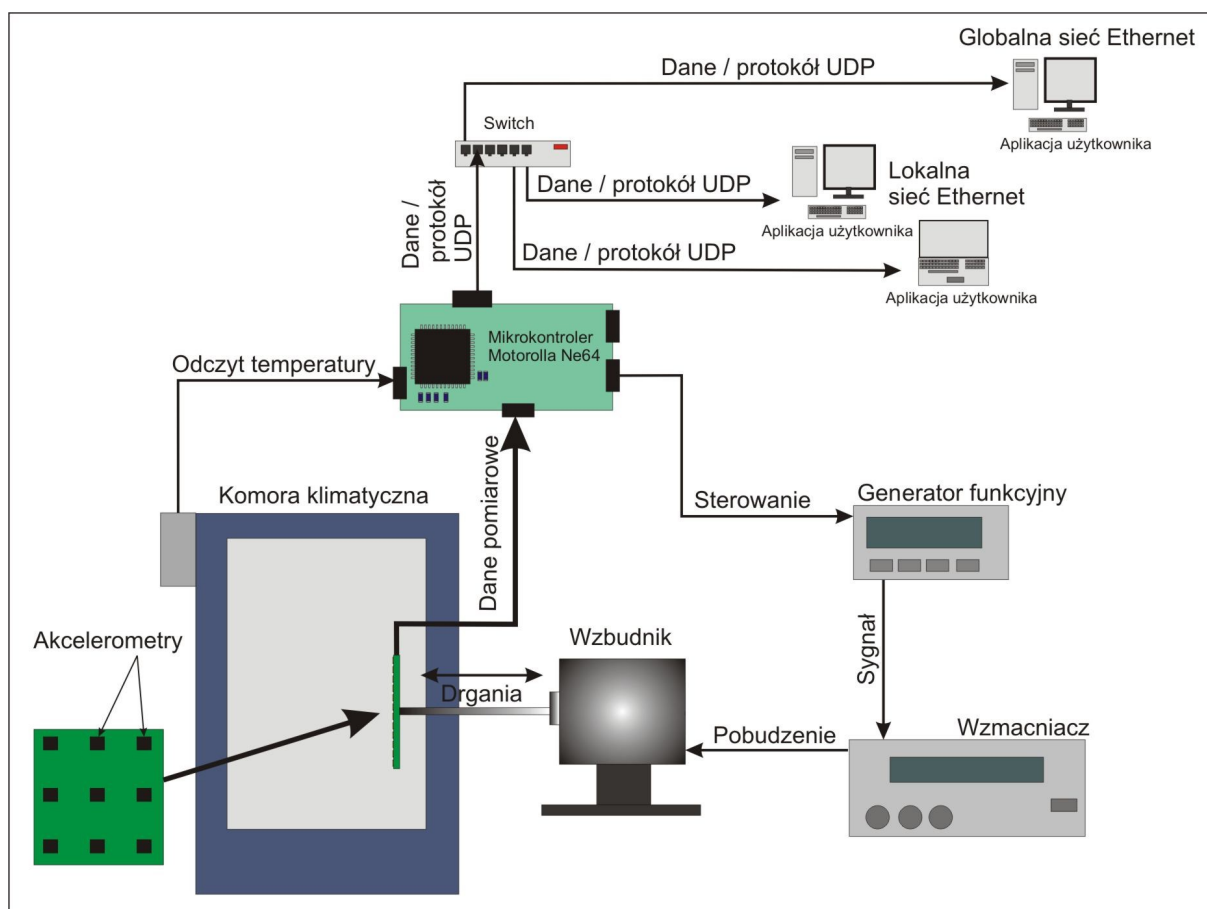
Niezależnie od prowadzonych badań eksperymentalnych prowadzono obliczenia numeryczne w pakiecie ABAQUS metodą elementów skończonych. Typ modelu zdefiniowano jako bryłę trójwymiarową (3D solid), a podczas siatkowania (mesh) zastosowano 20-węzłowe elementy sześciennie typu naprężenie/odkształcenie o zredukowanym całkowaniu (C3D20R). Elementy te odznaczały się 3 aktywnymi stopniami swobody. Przeprowadzono symulację testu wibracyjnego uzyskując animację płytki ulegającej odkształceniom. Obraz animacji zatrzymanej podczas maksymalnego odkształcenia płytki przedstawiono na rysunku 8.10B. Porównując obrazy maksymalnie odkształconych płytek, przedstawionych na obydwu częściach rysunku 8.10, można uznać, że opracowany model w zadowalającym stopniu odzwierciedla rzeczywiste odkształcenia płytki.

8.3.4 Wpływ temperatury na odkształcenia płytek testowych poddawanych wibracjom

Podczas prowadzonych przyspieszonych testów niezawodności płytki testowe poddawane są wibracjom w warunkach cyklicznie zmieniającej się temperatury. Amplituda zmian temperatury w komorze klimatycznej wynosi 150°C i jest ograniczona temperaturą minimalną równą -30°C oraz temperaturą maksymalną +120°C. W tak szerokim zakresie temperatur sztywność laminatów FR4 może ulegać istotnym zmianom. Skutkiem zmian sztywności płytki poddawanej wibracjom jest zmiana odkształceń płytki, a tym samym zmiana naprężeń w obrębie badanych złączy lutowanych. Zakres zmian sztywności płytki zależy nie tylko od zastosowanego laminatu, ale także od wzoru mozaiki przewodzącej, gabarytów, masy oraz rozmieszczenia elementów przylutowanych do jej powierzchni.

W celu zbadania wpływu temperatury na sztywność testowych płytek obwodów drukowanych zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, umożliwiające jednoczesny pomiar przyspieszenia w wielu punktach płytki poddawanej wibracjom. Zarówno stanowisko jak i zastosowaną procedurę badawczą opracowano w oparciu o wcześniejsze badania eksperymentalne [124] przeprowadzone w ramach współpracy z laboratorium CALCE (ang. The Center for Advanced Life Cycle Engineering) Electronic Products and Systems, jednostką na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Stanu Maryland (USA) [125].

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 8.12.



Rysunek 8.12: Stanowisko umożliwiające badanie odkształceń płytek obwodów drukowanych poddawanych wibracjom w szerokim spektrumie temperatury

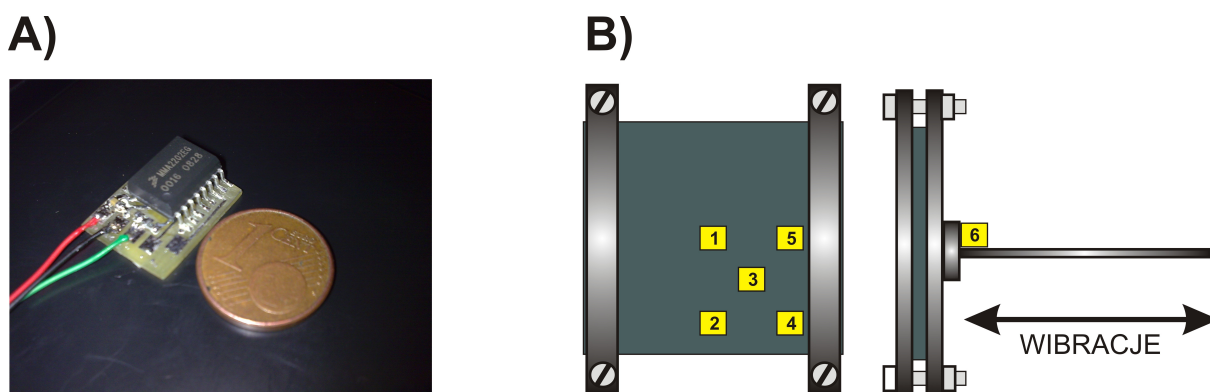
Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów:

- matrycy przyspieszeniomierzy firmy Freescale [126],
- rezystora termometrycznego Pt100,
- komory klimatycznej Challenge 250 firmy Angeloantoni Industrie [127],
- elektrodynamicznego wzбудnika drgań V400 firmy LDS [128],
- wzmacniacza sygnałów akustycznych (sygnałów pobudzenia),
- generatora sygnałów akustycznych (sygnałów pobudzenia),
- mikrokontrolera NE64 firmy Freescale, odpowiedzialnego za transmisję danych pomiarowych oraz sterującego nastawami systemu [126],
- przełącznika sieciowego,

- komputera osobistego z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem.

Zastosowanie mikrokontrolera umożliwiło jednoczesny odczyt wartości skutecznej przyspieszenia w sześciu punktach oraz odczyt aktualnej temperatury w komorze klimatycznej. Mikrokontroler gromadzi dane pomiarowe zapisując je w tzw. ramkach. Ramki przesyłane są w sieci komputerowej Ethernet (protokół UDP) do komputera, na którym zainstalowano dedykowane oprogramowanie służące do akwizycji danych pomiarowych. Podczas testu przeprowadzono około 500 tys. pomiarów chwilowego przyspieszenia. Pomiar przeprowadzono z częstotliwością 70 kHz.

Płytkę testową umieszczono wewnątrz komory klimatycznej, mocując ją w uchwycie wzbudnika (rysunek 8.13B). Do przeprowadzenia pomiarów przyspieszenia użyto komercyjnych mikromechanicznych przyspieszeniomierzy firmy Freescale o maksymalnej mierzalnej wartości przyspieszenia równej 50 g. Pięć przyspieszeniomierzy przytwierdzono do powierzchni płytki. Natomiast jeden przyspieszeniomierz przytwierdzono do uchwytu w celu uzyskania sygnału referencyjnego. Do przymocowania akcelerometrów użyto żywicy epoksydowej. Przyjęto, iż sztywność uchwytu składającego się z ceowników wykonanych z duraluminium (wieloskładnikowy stop aluminium, miedzi, magnezu, manganu z domieszkami krzemu oraz żelaza) nie ulega zmianom w badanym przedziale temperatur (od -30°C do $+120^{\circ}\text{C}$). Widok pojedynczego przyspieszeniomierza przylutowanego do podłoża z elementami pasywnymi SMD oraz rozmieszczenie akcelerometrów przedstawiono na rysunku 8.13.



Rysunek 8.13: Badanie odkształceń testowej POD poddawanej wibracjom : A) jeden z akcelerometrów używanych podczas badań, B) rozmieszczenie przyspieszeniomierzy podczas badań

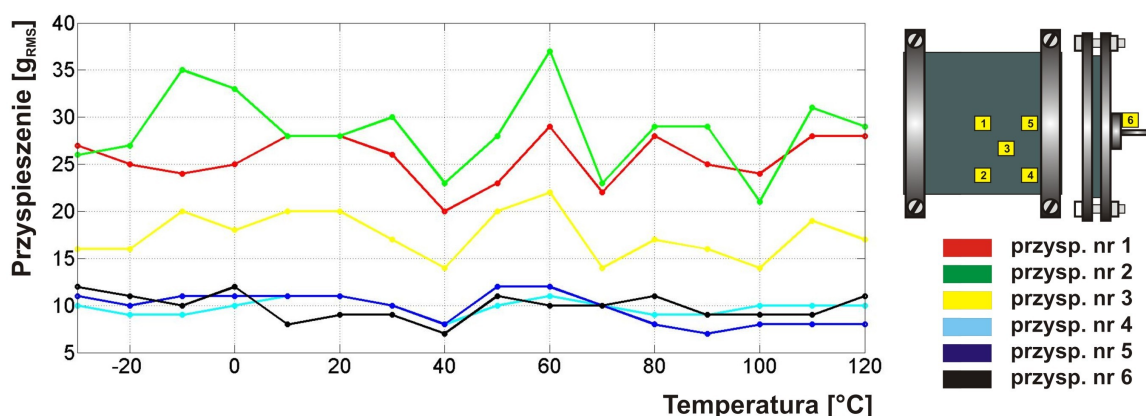
Podczas badań testową płytkę obwodów drukowanych poddano wibracjom losowym o częstotliwościach z zakresu 50-500 Hz i stałym poziomie gęstości widmowej mocy. Przyspieszenie skuteczne zmierzone u nasady uchwytu wyniosło 8 g, co jest równoważne

gęstości widmowej mocy drgań równej $0,14 \text{ g}^2/\text{Hz}$. W ten sposób powtórzono podczas pomiarów narażenia mechaniczne, którym poddawane są płytki podczas przeprowadzanych testów niezawodności.

W ramach badań przeprowadzono dwie serie jednoczesnych pomiarów przyspieszenia w sześciu punktach oraz temperatury wewnątrz komory klimatycznej w celu określenia histerezy pomiarowej. Podczas pierwszej serii pomiarów przyspieszenia temperatura wewnątrz komory klimatycznej rosła od -30°C do $+120^\circ\text{C}$ ze stałym narostem równym $+3^\circ\text{C}$ na minutę. Podczas drugiej serii pomiarów temperatura malała od $+120^\circ\text{C}$ do -30°C ze stałym spadkiem -3°C na minutę. Temperaturę w komorze klimatycznej mierzono za pomocą rezystora termometrycznego. Na podstawie porównania wyników pomiarów przeprowadzonych podczas obu serii nie stwierdzono obecności histerezy pomiarowej.

Przyspieszenie chwilowe płytki jest równe pochodnej jej prędkości względem czasu oraz drugiej pochodnej jej położenia względem czasu. Jeżeli testowa płytka obwodu drukowanego byłaby idealnie sztywna, to wartość skuteczna przyspieszenia mierzonego w dowolnym punkcie płytki byłaby taka sama. Jeżeli sztywność płytki testowej nie ulegałaby zmianie pod wpływem temperatury, to wartość skuteczna przyspieszenia mierzona w różnych temperaturach również nie ulegałaby zmianie.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykreślono wykres wartości skutecznej przyspieszenia w funkcji temperatury w badanych punktach. Wykres przedstawiono na rysunku 8.14.



Rysunek 8.14: Wykres przyspieszenia skutecznej płytki testowej w funkcji temperatury

Jak widać, wartość skuteczna przyspieszenia zależy istotnie od lokalizacji przyspieszeniomierza na powierzchni płytki testowej. Niezależnie od temperatury panującej w komorze klimatycznej największe wartości przyspieszenia skutecznego mierzono

w punkcie centralnym oraz w okolicach krawędzi płytki testowej (przyspieszeniometer nr 1 oraz nr 2), co oznacza, że środek płytki testowej ulega największym odkształceniom niezależnie od temperatury panującej w komorze, w konsekwencji czego złącza lutowane elementów zlokalizowanych w obszarach płytki poddawanych największym naprężeniom, które przedstawiono na rysunku 8.11 będą poddawane największym narażeniom w pełnym zakresie temperatur przeprowadzanych testów niezawodności złączy lutowanych (od -30°C do $+120^{\circ}\text{C}$).

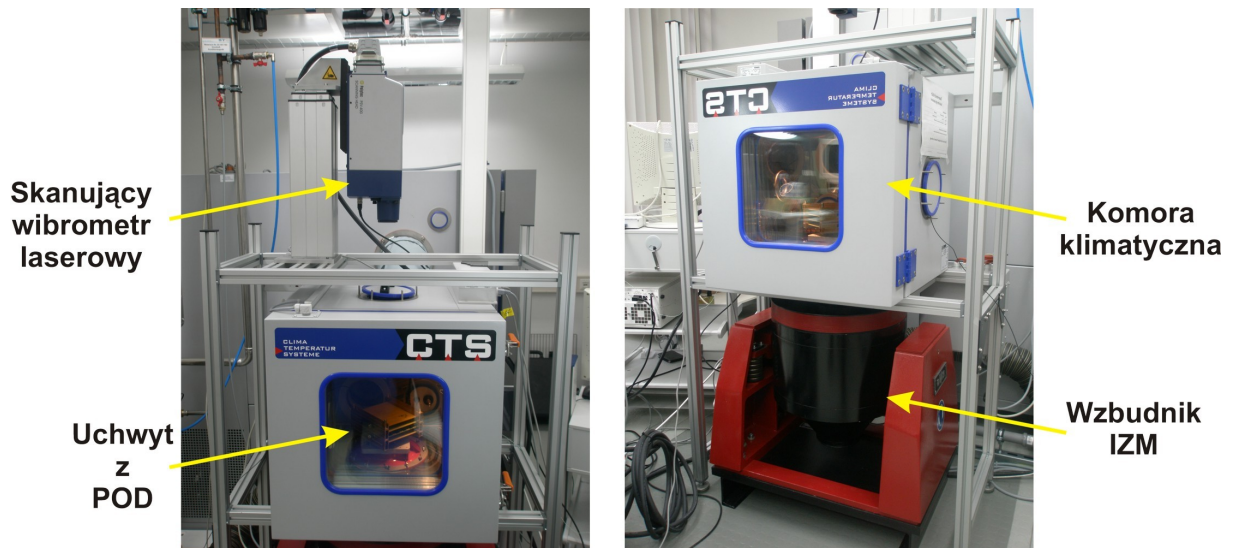
Wskutek zmian temperatury sztywność płytki ulega zmianie o czym mogą świadczyć zauważalne zmiany wartości przyspieszenia skutecznego (rysunek 8.14) mierzonego w punkcie centralnym (akcelerometr nr 1) oraz w okolicach krawędzi płytki (akcelerometr nr 2). Z kolei zmiany wartości przyspieszenia skutecznego mierzonego w okolicach uchwytu, usztywnionych przez uchwyt (akcelerometr nr 4 oraz 5) oraz na uchwycie (akcelerometr nr 6), można uznać za nieistotne, pomijalne.

Wiedząc, jakim narażeniem środowiskowym i mechanicznym poddawana jest płytka obwodu drukowanego podczas pracy, można istotnie zmniejszyć gęstość widmową mocy drgań oraz ich rozkład na płycie dobierając materiał podłoża odpowiedni pod względem współczynników opisujących jego odkształcalność. Zmniejszenie gęstości widmowej mocy drgań płytki o kilkanaście procent może istotnie wydłużyć czas do wystąpienia uszkodzeń zmęczeniowych złączy lutowanych poddawanych narażeniom.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w zakresie temperatur standardowego użytkowania urządzeń (np. od $+30^{\circ}\text{C}$ do $+90^{\circ}\text{C}$) wpływ temperatury na sztywność testowej płytki obwodów drukowanych jest zauważalny. Wartość skuteczna przyspieszenia centralnego punktu płytki wahała się w zakresie 20-30 g [129].

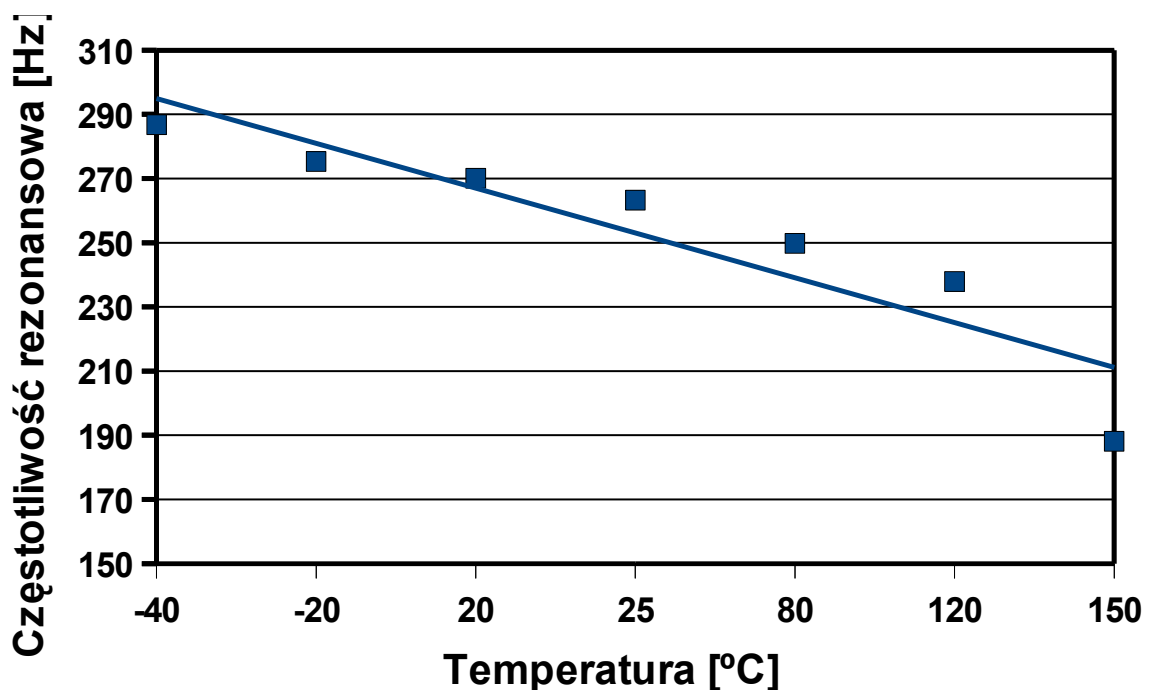
8.3.5 Wpływ temperatury na częstotliwość rezonansową testowych płytek obwodów drukowanych

W celu określenia wpływu temperatury na częstotliwość rezonansową płytki testowej przeprowadzono pomiary przyspieszenia płytki poddawanej wibracjom losowym o częstotliwościach z zakresu 50-500 Hz w różnych temperaturach. Do pomiarów przyspieszenia płytki w jej centralnym punkcie użyto skanującego wibrometru laserowego. Pomiary prowadzono w temperaturach -40 , -20 , $+20$, $+25$, $+80$, $+120$ i $+150^{\circ}\text{C}$. Stanowisko badawcze pokazano na rysunku 8.15.



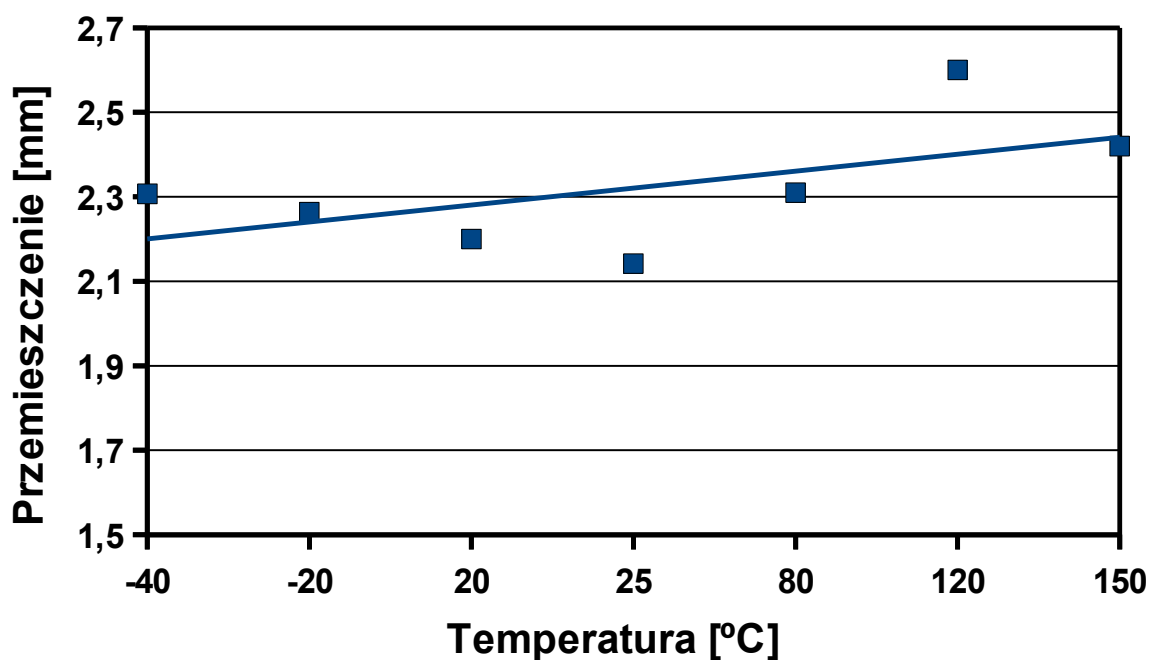
Rysunek 8.15: Stanowisko do badania częstotliwości rezonansowej płytki w różnych temperaturach

Na podstawie przeprowadzonych badań wykreślono wykres zmian częstotliwości rezonansowej (rysunek 8.16) oraz przemieszczenia (wychylenia) centralnego punktu płytki w funkcji temperatury (rysunek 8.17).



Rysunek 8.16: Wykres zmian częstotliwości rezonansowej płytki testowej poddawanej wibracjom w funkcji temperatury

Badania wykazały, że wraz ze wzrostem temperatury maleje częstotliwość rezonansowa płytki. Jednocześnie wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się przemieszczenie punktu centralnego płytki, co oznacza zwiększenie odkształcenia płytki poddawanej wibracjom.



Rysunek 8.17: Wykres zmian amplitudy przemieszczenia centralnego punktu płytki testowej poddawanej wibracjom w funkcji temperatury

Badania wykazały, że wraz ze wzrostem temperatury maleje częstotliwość rezonansowa płytki. Jednocześnie wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się przemieszczenie punktu centralnego płytki, co oznacza zwiększenie odkształcenia płytki poddawanej wibracjom.

Po przekroczeniu temperatury zeszklenia T_g laminatu FR4, równej 130°C , częstotliwość rezonansowa ulega gwałtownemu przesunięciu w kierunku niższych częstotliwości. Jest to spowodowane znacznym spadkiem modułu Younga powyżej temperatury zeszklenia T_g , co objawia się istotnym zmniejszeniem sztywności płytki. Na przykład, w temperaturze 120°C częstotliwość rezonansowa płytki wynosi 238 Hz, natomiast w temperaturze 150°C wynosi zaledwie 188 Hz.

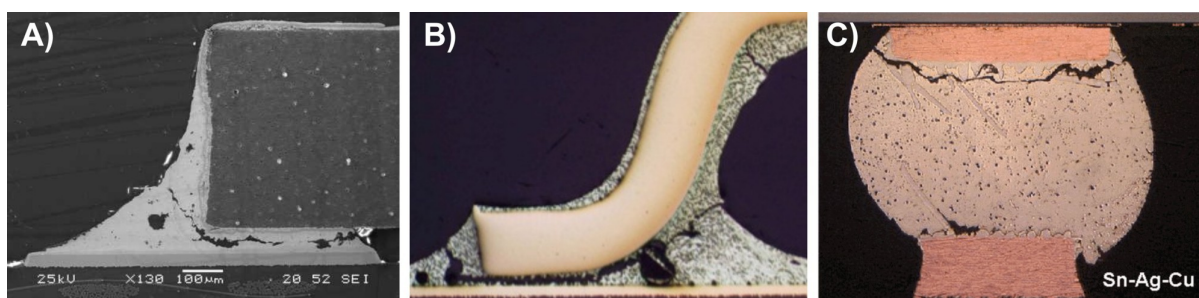
Badania eksperymentalne potwierdziły, że im częstotliwość rezonansowa płytki obwodu drukowanego jest wyższa, tym mniejszym odkształceniom i naprężeniom ulega płytka. Na podstawie przeprowadzonych badań można wywnioskować, że podczas prowadzonych przyspieszonych testów niezawodności (płytki poddawana wibracjom w temperaturze zmieniającej się w zakresie od -30°C do $+120^{\circ}\text{C}$) złącza ulegają największym naprężeniom wynikającym z wibracji w temperaturze $+120^{\circ}\text{C}$, natomiast najmniejszym w temperaturze -30°C . Cykliczna zmiana temperatury złączy lutowanych poddawanych wibracjom znacznie przyspiesza występowanie zmian zmęczeniowych w ich strukturze.

8.4 Własne stanowisko badawcze

8.4.1 Istota szybkich, wielokanałowych pomiarów rezystancji złączy poddawanych przyspieszonym testom niezawodności, opis stanowiska

Na potrzeby przyspieszonych testów niezawodności złączy opracowano stanowisko badawcze, umożliwiające poddawanie płytek obwodów drukowanych z przylutowanymi elementami wibracjom w warunkach cyklicznie zmieniającej się temperatury. Wielokanałowy system pomiarów rezystancji w sposób jednoznaczny pozwala na identyfikację uszkodzonych złączy i rejestrację warunków, w jakich nastąpiło uszkodzenie.

Przy pomiarach elektrycznych w warunkach statycznych pęknięte złącze lutowane może w dalszym ciągu przewodzić prąd elektryczny, o ile mimo pęknięcia zachowany jest kontakt mechaniczny między powierzchniami złącza. Przykłady pękniętych złączy, w których może nie być wykryty defekt pokazano na rysunku 8.18 [130], [131], [132].



Rysunek 8.18: Pęknięte złącza lutowane, które mogą przewodzić prąd elektryczny: A) rezystor SMD [130], B) wyprowadzenie w kształcie skrzydła mewy (ang. gull wing) obudowy typu SO (ang. Small Outline) [131], C) połączenie sferyczne flip chip [132]

Pęknięte złącza poddawane czynnikom narażeniowym, głównie mechanicznym, mogą być przyczyną chwilowych lub permanentnych rozwarć w obwodach elektrycznych. W warunkach statycznych, w których złącza nie są poddawane narażeniom, pomiary rezystancji mogą nie ujawnić pęknięć, dlatego ocena wytrzymałości zmęczeniowej złączy oparta na porównaniu wartości rezystancji zmierzonej przed i po wykonaniu testu niezawodności jest mało wiarygodna.

Ocena jakości złączy oparta na ciągłych pomiarach rezystancji podczas testów niezawodności znacznie bardziej uprawdopodobnia wykrycie wady. Stosując odpowiednio dużą częstotliwość pomiarową możliwa jest detekcja chwilowych rozwarć. Częstotliwość pomiarowa determinuje minimalny czas trwania chwilowych rozwarć możliwych do zarejestrowania. Czas trwania chwilowych rozwarć pękniętych złączy poddawanych wibracjom zależy od częstotliwości drgań własnych badanego obiektu, częstotliwości drgań

własnych płytki obwodu drukowanego, częstotliwości drgań wymuszonych i lokalizacji złączy na płycie. Zastosowana w systemie częstotliwość próbkowania kanałów analogowych jest równa $1,25 \cdot 10^6$ próbek \cdot 1/s, co umożliwia detekcję chwilowych rozwarć trwających co najmniej kilka μ s.

Wielokanałowe pomiary rezystancji zapewniają możliwość:

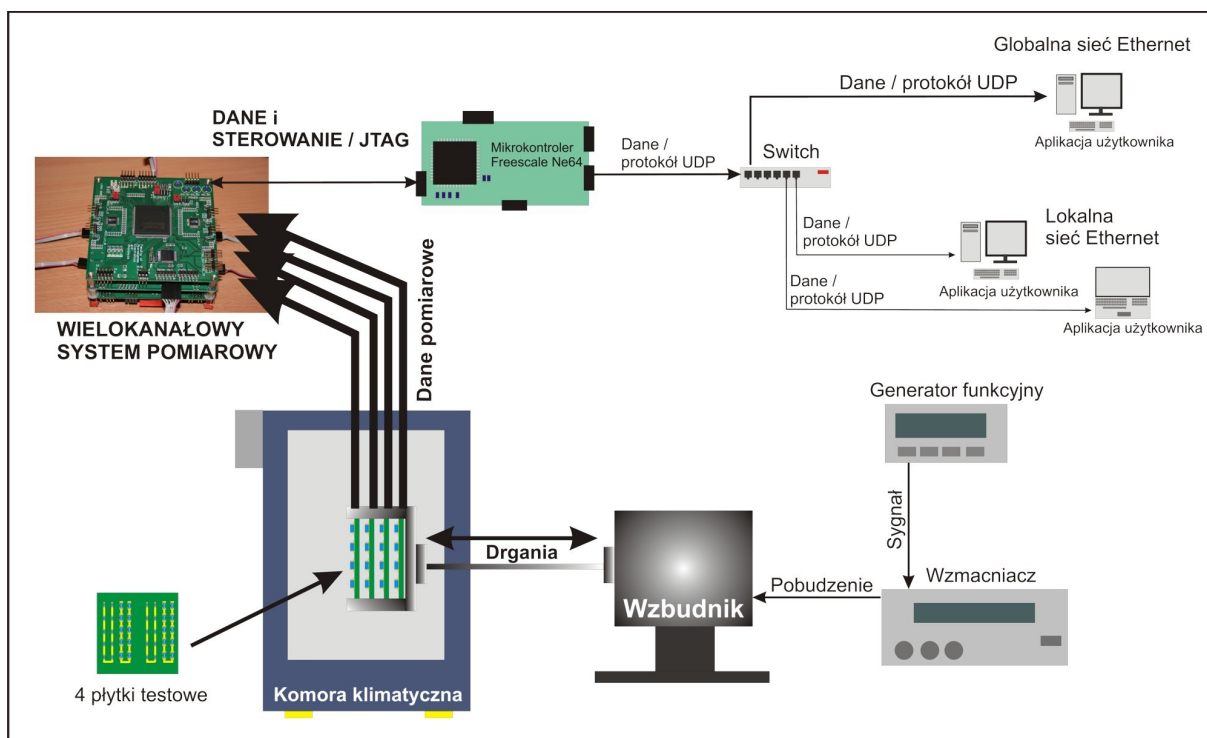
- jednoczesnego badania złączy lutowanych takich samych wyprowadzeń poddawanych różnym naprężeniom (co wynika z różnego ich umiejscowienia na powierzchni płytki),
- jednoczesnego badania złączy lutowanych różnych wyprowadzeń poddawanych takim samym naprężeniom,
- badanie wielu złączy lutowanych, co umożliwia przeprowadzanie analiz statystycznych.

W opracowanym stanowisku badawczym płytki obwodów drukowanych poddawane są jednocześnie dwóm różnym czynnikom narażeniowym – cyklicznym zmianom temperatury i wibracjom. Podczas testów niezawodności złączy lutowanych prowadzone są pomiary rezystancji łańcuchów składających się z przylutowanych do pól lutowniczych płytek, połączonych szeregowo zwór SMD 1206 oraz 0805. Pomiary przeprowadzane są w sposób ciągły, w celu jednoznacznego określenia momentu wystąpienia przerwy w obwodzie elektrycznym badanego łańcucha. Spodziewanym efektem poddawania płytek obwodów drukowanych czynnikom narażeniowym są pęknięcia złączy lutowanych. Wprawdzie rozwarcia obwodu mogą być spowodowane również pęknięciem zwór lub ścieżek mozaiki przewodzącej, jednakże podczas oceny wizualnej efektów testów takich uszkodzeń nie stwierdzono. Schemat opracowanego stanowiska do badania niezawodności złączy lutowanych pokazano na rysunku 8.19.

Stanowisko składa się z następujących segmentów:

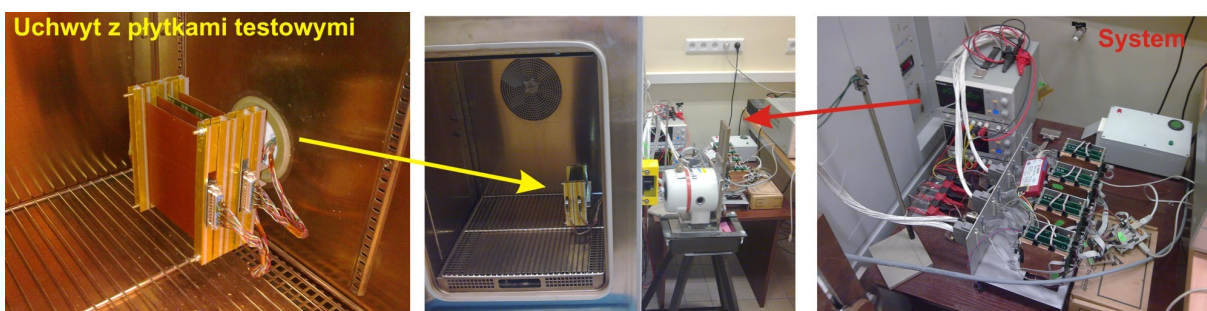
- wielokanałowego systemu diagnostyczno-pomiarowego,
- komory klimatycznej Challenge 250 firmy Angeloantoni Industrie [127],
- elektrodynamicznego wzbudnika drgań V400 firmy LDS [128],
- wzmacniacza sygnałów akustycznych (sygnałów pobudzenia),
- generatora sygnałów akustycznych (sygnałów pobudzenia),

- mikrokontrolera NE64 firmy Freescale, odpowiedzialnego za transmisję danych pomiarowych oraz sterującego nastawami systemu [126],
- przełącznika sieciowego,
- komputera osobistego z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem.



Rysunek 8.19: Schemat stanowiska do prowadzenia przyspieszonych testów niezawodności złączy lutowanych

Widok głównych zespołów stanowiska badawczego pokazano na rysunku 8.20.



Rysunek 8.20: Główne elementy stanowiska do prowadzenia przyspieszonych testów niezawodności złączy lutowanych: wnętrze komory klimatycznej z zamocowanymi płytkami testowymi, system diagnostyczno-pomiarowy

8.4.2 Wielokanałowy system diagnostyczno-pomiarowy

Wielokanałowy system diagnostyczno-pomiarowy umożliwiający przeprowadzanie szybkich pomiarów oraz archiwizację danych pomiarowych został od podstaw

zaprojektowany i wykonany na potrzeby przyspieszonych testów niezawodności złączy lutowanych.

Głównym zadaniem systemu pomiarowego jest detekcja zmian rezystancji badanych kanałów (łańcuchów złączy) podczas testów niezawodności oraz detekcja zdarzeń zgodnie z opracowanym algorytmem. Płytki testowe, dla których wykonywane są pomiary rezystancji, umieszczane są w komorze klimatycznej i poddawane wibracjom. System pomiarowy znajduje się na zewnątrz komory, co wymaga połączeń elektrycznych między testowanymi łańcuchami złączy i systemem zasilająco-pomiarowym. Długość przewodów pomiarowych wynosi ok. 1 m, zaś ich przekrój powinien być możliwie najmniejszy w celu minimalizacji masy okablowania i jej niekorzystnego wpływu na wartości przyspieszeń płytek obwodów drukowanych uzyskiwanych wskutek wibracji (rozdział 8.3). Niewielki przekrój, znaczna długość przewodów oraz zmiany temperatury w szerokim zakresie powodują zmiany ich rezystancji wielokrotnie przekraczające zmiany wartości mierzonych. W praktyce wymusza to wybór czteropunktowej, pośredniej metody pomiaru rezystancji, zgodnie z rysunkiem 6.1. Podczas pomiarów system archiwizuje wybrane istotne informacje zapisując je w ramkach o pojemności 3200 bitów. System wysyła do mikrokontrolera ramki w stałych, ustalanych przez użytkownika odstępach czasu, wyznaczających cykl pomiarowy.

W ramach przesyłane są następujące informacje dotyczące bieżącego cyklu pomiarowego:

- maksymalne wartości rezystancji badanych kanałów,
- liczba zdarzeń polegających na stałych lub chwilowych zmianach rezystancji badanych kanałów,
- ostatni zarejestrowany stan kanałów (zwarcie lub rozwarcie).

Ponadto system umożliwia odczyt wskazań czujników o wyjściu napięciowym lub prądowym, np. termopar, przyspieszeniomierzy, tensometrów. Dane z czujników mogą być zapisywane w ramkach, w których zapisywane są informacje dotyczące badanych kanałów.

Zastosowanie specyficznych, nowatorskich rozwiązań, obejmujących możliwość wprowadzania zmian funkcjonalności systemu przez zmianę zaimplementowanego algorytmu oraz modułarna konstrukcja zapewniają szerokie spektrum zastosowania opracowanego systemu [133], [134], [135].

8.4.3 Konstrukcja i parametry systemu diagnostyczno-pomiarowego

System składa się z ośmiu identycznych modułów, umożliwiających przeprowadzanie pomiarów rezystancji maksymalnie 16 kanałów. Każdy z modułów może pracować niezależnie od pozostałej części systemu, a zasoby systemu można zwiększać przez dodawanie kolejnych modułów. Konstrukcję pojedynczego modułu oraz systemu pomiarowego pokazano na rysunku 8.21.



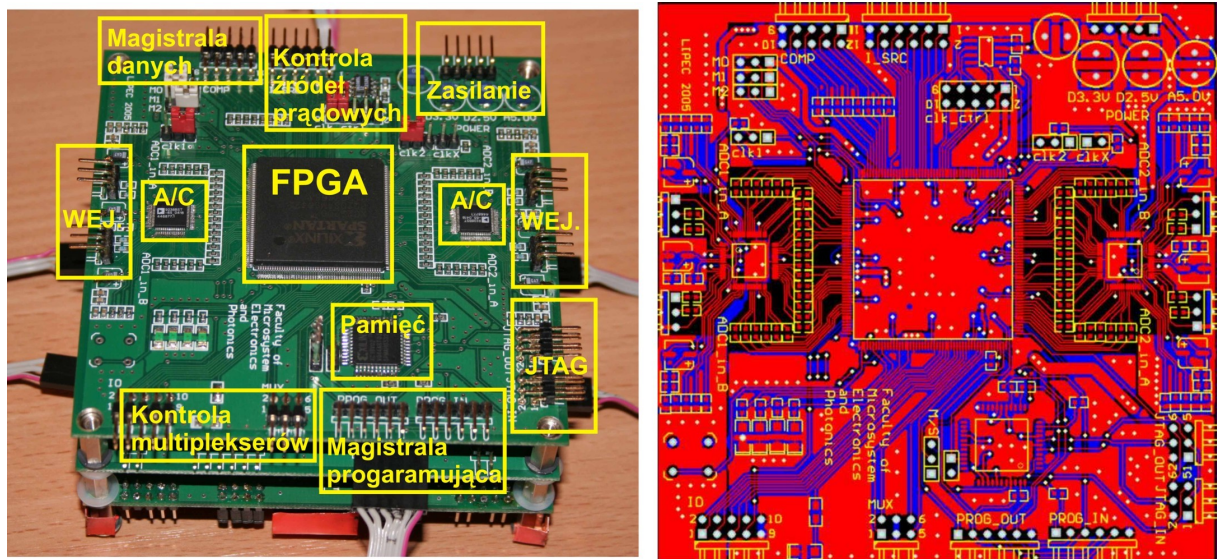
Rysunek 8.21: Konstrukcja pojedynczego modułu oraz kompletnego systemu

Każdy moduł składa się z następujących zespołów montowanych na oddzielnych płytkach obwodów drukowanych:

- zespół płytki głównej zawierający programowalną matrycę bramek logicznych FPGA (ang. Field Gate Programmable Gate Array) oraz dwa dwukanałowe przetworniki analogowo-cyfrowe,
- zespół wejściowy zawierający multipleksery oraz dwa stopnie wzmacniaczy wejściowych,

- zespół wyjściowy zawierający programowalne źródła prądowe.

Zespoły są komplementarne pod względem funkcjonalnym i połączone ze sobą magistralami sterującymi i wymiany danych. Zespół płytki głównej z wyszczególnionymi układami elektronicznymi, magistralami oraz portami pokazano na rysunku 8.22.

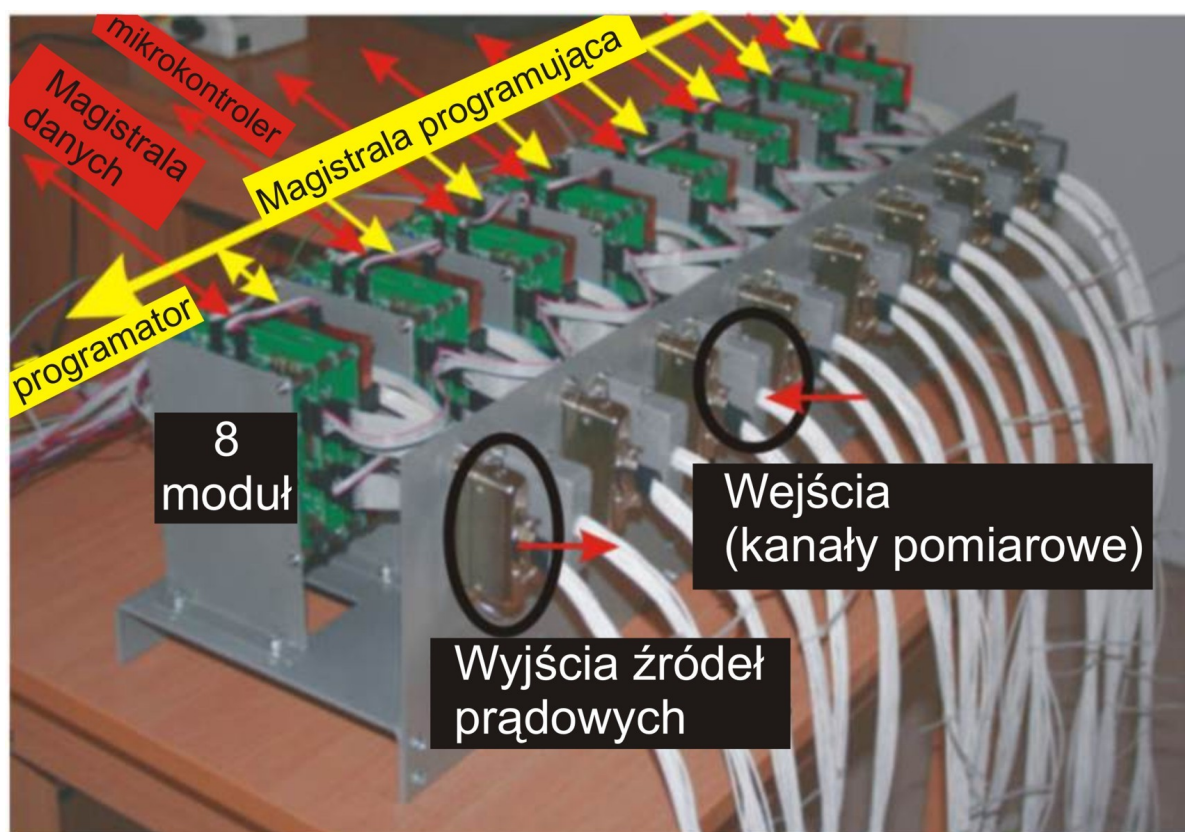


Rysunek 8.22: Płytki główne modułu

Użyte struktury FPGA mają wewnętrzną pamięć RAM (ang. Random Access Memory), lecz nie posiadają pamięci nieulotnej. W związku z tym należy je zaprogramować po każdym zresetowaniu systemu, czy też chwilowym zaniku napięcia zasilania. W celu zwiększenia ergonomii oraz autonomiczności systemu wszystkie moduły połączone ze sobą magistralą programującą, umożliwiającą programowanie struktur FPGA z pamięci zamontowanej na płycie głównej jednego z modułów. Użyto pamięć typu EPROM (ang. Erasable Programmable Read-Only Memory), dzięki czemu przechowywany program (algorytm), nie ulega usunięciu z pamięci po odłączeniu zasilania. Pamięć EPROM jest programowana za pomocą programatora podłączonego do komputera, na którym uruchomiono aplikację programującą. Płytki, na której zamontowano pamięć jest podłączona do programatora przez interfejs JTAG (ang. Joint Test Action Group). Przewidziano również możliwość bezpośredniego programowania struktur FPGA, bez udziału pamięci EPROM, za pomocą programatora podłączonego do płytki głównej dowolnego modułu.

Bieżący stan struktur FPGA monitorowany jest za pomocą trzybitowej magistrali sterującej. Magistrala łączy poszczególne moduły z mikrokontrolerem podłączonym do sieci Ethernet. Za pomocą magistrali sterującej przesyłane są rozkazy i nastawy z komputera do struktur FPGA, a także dane pomiarowe z matrycy FPGA do komputera. Magistrale systemu

pokazano na rysunku 8.23.



Rysunek 8.23: Główny magistrale systemu diagnostyczno-pomiarowego

System umożliwia pomiar zmian rezystancji oraz detekcję zdarzeń 128 kanałów analogowych. Maksymalna częstotliwość próbkowania kanałów przy włączonych multiplexerach wynosi $16 \cdot 10^6$ próbek \cdot 1/s, natomiast po wyłączeniu multiplexerów wzrasta do $64 \cdot 10^6$ próbek \cdot 1/s. Wyłączenie multiplexerów wiąże się z czterokrotnym zmniejszeniem liczby monitorowanych kanałów. Częstotliwość roboczą próbkowania w przypadku każdego ze 128 kanału zmniejszono do $1,25 \cdot 10^6$ próbek 1/s. Czynnikiem determinującym maksymalną częstotliwość próbkowania jest część analogowa systemu. Tor analogowy systemu składa się z dwóch niezależnych części — jedna z nich służy do pomiaru małych napięć (zespoły wejściowe), a druga do zadawania pobudzenia prądem stałym (zespoły wyjściowe).

Analogowe stopnie wejściowe systemu zostały zaprojektowane w taki sposób, aby możliwy był pomiar rezystancji połączeń w szerokim zakresie (od kilku miliomów do kilkudziesięciu kiloomów) z częstotliwościami próbkowania sięgającymi nawet kilkudziesięciu megaherców. Względy ekonomiczne, jak i konstrukcyjne zdecydowały o użyciu analogowych multiplexerów dla stopni wejściowych, co pozwoliło czterokrotnie

zmniejszyć liczbę kosztownych szybkich przetworników analogowo-cyfrowych. Jeden kanał przetwornika A/C obsługuje cztery wejścia analogowe, co w sumie umożliwia podłączenie 128 kanałów analogowych: 8 modułów, 2 przetworniki dwukanałowe na moduł, 4 wejścia analogowe na 1 kanał przetwornika. Dla uzyskania wysokich częstotliwości próbkowania każdego z wejść analogowych i obserwacji krótkotrwałych zmian rezystancji wymagane jest szybkie przełączanie multiplekserów, co pociąga za sobą ryzyko powstania przesłuchów między kanałami, spowodowanych skończonymi czasami ustalania napięć w układach wzmacniaczy operacyjnych działających w warunkach szybkich zmian sygnałów wejściowych. To niekorzystne zjawisko zostało wyeliminowane na poziomie kodu w języku opisu sprzętu oraz przez staranny wybór szybkich szerokopasmowych wzmacniaczy symetryzujących.

Tor analogowy zawiera dwa stopnie wzmacniaczy. Pierwszy stopień to szybkie asymetryczne wzmacniacze o małych napięciach niezrównoważenia i wzmocnieniu $k=10$. Drugi stopień to szybki wzmacniacz o asymetrycznym wejściu i symetrycznym wyjściu (powszechnie stosowanym w szybkich przetwornikach A/C). Sygnały analogowe przetwarzane są na sygnał cyfrowy za pomocą 12-bitowych dwukanałowych przetworników analogowo-cyfrowych rozmieszczonych na płytkach głównych. Każda z zamontowanych struktur FPGA współpracuje z dwoma przetwornikami A/C pracującymi z częstotliwością 10 MHz (maksymalna częstotliwość pracy przetworników wynosi 64 MHz). Sygnał cyfrowy trafia bezpośrednio na wejścia układu FPGA, gdzie podlega przetwarzaniu w ramach zaimplementowanego algorytmu.

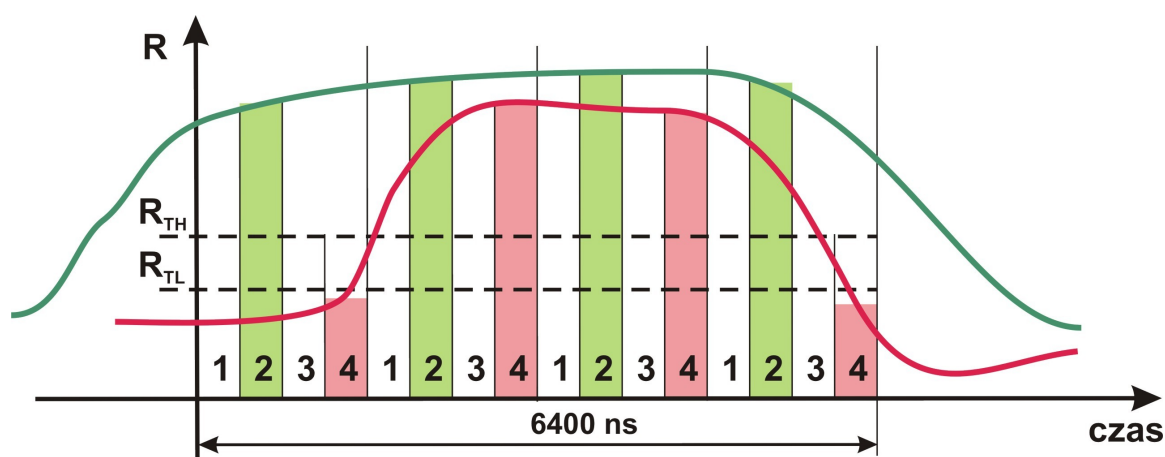
Programowalne źródła prądowe to źródła napięciowe o cyfrowo zadawanym napięciu z zakresu od 0 do 4096 mV z 12 bitową rozdzielczością oraz szeregowo włączanym rezystorem o wartości 200 Ω , 2 k Ω lub 200 k Ω . Uzyskano w ten sposób dużą rozpiętość zakresów pomiarowych i zapewniono możliwość przeprowadzania automatycznych procedur kalibracji systemu. Maksymalny prąd dla każdego kanału pomiarowego wynosi 10 mA.

Regulowane napięcie każdego ze źródeł to dodatkowy, skuteczny sposób na zmniejszenie zakłóceń spowodowanych multipleksowaniem wejść analogowych. Oprogramowanie sterujące w chwili wykrycia trwałego rozwarcia lub istotnego wzrostu rezystancji na jednym lub kilku wejściach multipleksera może automatycznie dobrać wartość rezystancji szeregowej i w razie potrzeby obniżyć napięcie odpowiednich źródeł napięciowych. Bieżąco zadane wartości napięcia źródła, rezystancji szeregowej źródła oraz zmierzona wartość napięcia są przeliczane na zmierzoną wartość rezystancji.

8.4.4 Zasada działania algorytmu detekcji zdarzeń

Strumień danych pomiarowych analizowanych przez system podczas monitorowania 128 kanałów osiąga wartość 240 MB/s. ($128 \text{ kanałów} \cdot 1,25 \times 10^6 \cdot \text{próbek} \cdot 1/\text{s} \cdot 12 \text{ bitów} = 240 \text{ MB/s}$). Zadaniem systemu jest ciągle monitorowanie kanałów analogowych oraz archiwizacja informacji dotyczących wszystkich zdarzeń występujących podczas testu. Jako zdarzenie należy rozumieć wzrost rezystancji złącza powyżej ustalonej wartości progowej równej rezystancji pękniętych złączy.

Częstotliwość próbkowania zapewnia możliwość detekcji zdarzeń trwających co najmniej kilka μs . Na rysunku 8.24 pokazano schematycznie multipleksowanie czterech kanałów (nr 1, 2, 3 oraz 4) oraz detekcję zdarzeń zarejestrowanych przez kanał nr 4 (linia czerwona) i kanał nr 2 (linia zielona). Zdarzenie rejestrowane przez kanał nr 4 (linia czerwona) trwa około $6 \mu\text{s}$ i jest teoretycznie najkrótszym zdarzeniem, które system może zarejestrować w warunkach multipleksowania kanałów. Po wyłączeniu multipleksatorów czas trwania najkrótszego zdarzenia zmniejsza się czterokrotnie do około $1,5 \mu\text{s}$. Zdarzenie rejestrowane przez kanał nr 2 (linia zielona) trwa ponad $6,4 \mu\text{s}$.



Rysunek 8.24: Multipleksowanie 4 kanałów, detekcja zdarzenia trwającego krócej niż $6,4 \mu\text{s}$ (kanał nr 4, linia czerwona) oraz zdarzenia trwającego dłużej niż $6,4 \mu\text{s}$ (kanał nr 2, linia zielona)

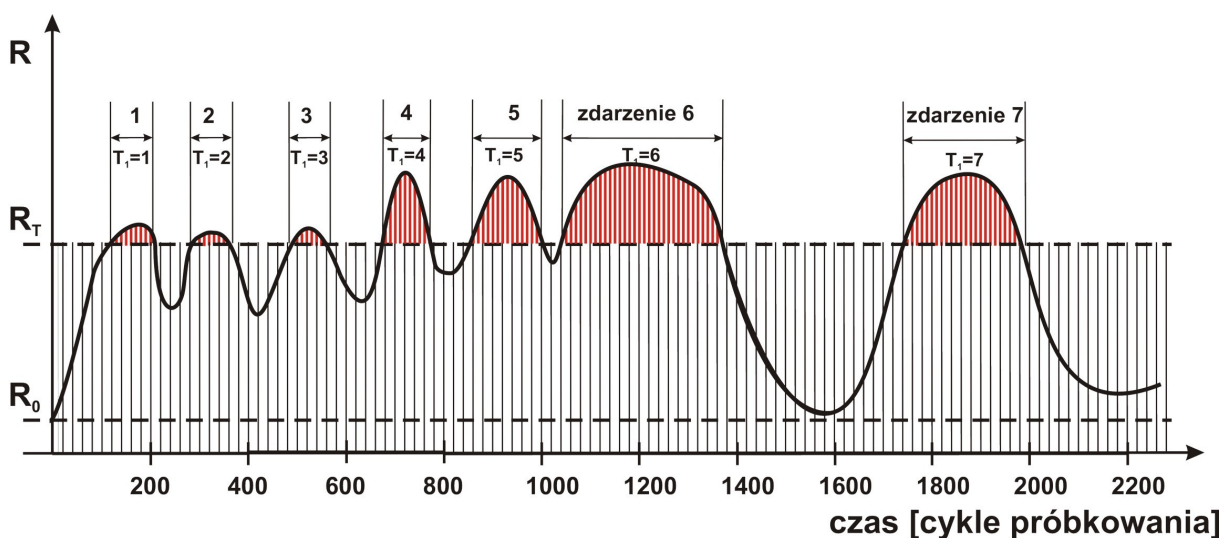
Rezystancja badanych kanałów mierzona jest dwukrotnie podczas każdego cyklu trwającego 400 ns (rysunek 8.24), po czym jest uśredniana w celu zwiększenia współczynnika S/N (ang. Signal to Noise Ratio). Uśrednione wartości rezystancji przechowywane są w rejestrach, w celu przeprowadzenia komparacji z wartościami progowymi zgodnie z opracowanym algorytmem.

Testy niezawodności mogą trwać nieprzerwanie wiele dni lub tygodni. Archiwizacja strumienia danych o wielkości 240 MB/s wysyłanego przez system jest obecnie praktycznie

niemożliwa w warunkach laboratoryjnych ze względu na ograniczenia przepustowości standardowych magistrali wymiany danych oraz ograniczenia zasobów sprzętowych, głównie pamięci masowej.

W celu umożliwienia archiwizacji danych bez utraty informacji o wszystkich zdarzeniach dłuższych niż 20 μ s, występujących podczas testu, wprowadzono wstępne przetwarzanie danych na poziomie systemu pomiarowego. Zastosowanie programowalnych struktur FPGA umożliwiło implementację opracowanego algorytmu detekcji zdarzeń, który redukuje strumień danych z 240 MB/s do około 112 kB/s bez utraty istotnych danych. Podczas testu niezawodności 128 kanałów trwającego 20 dni, na dysku twardym zapisywanych jest około 193 GB danych. W przypadku braku algorytmu dane zajęłyby przestrzeń dyskową równą 415 TB, co odpowiada macierzy 208 dysków twardych o pojemności jednostkowej 2000 GB.

Prosty algorytm, porównujący wartość mierzonej rezystancji do wartości progowej, pokazany na rysunku 8.25, jest podatny na przekłamania wynikające z zaszumienia sygnału analogowego.

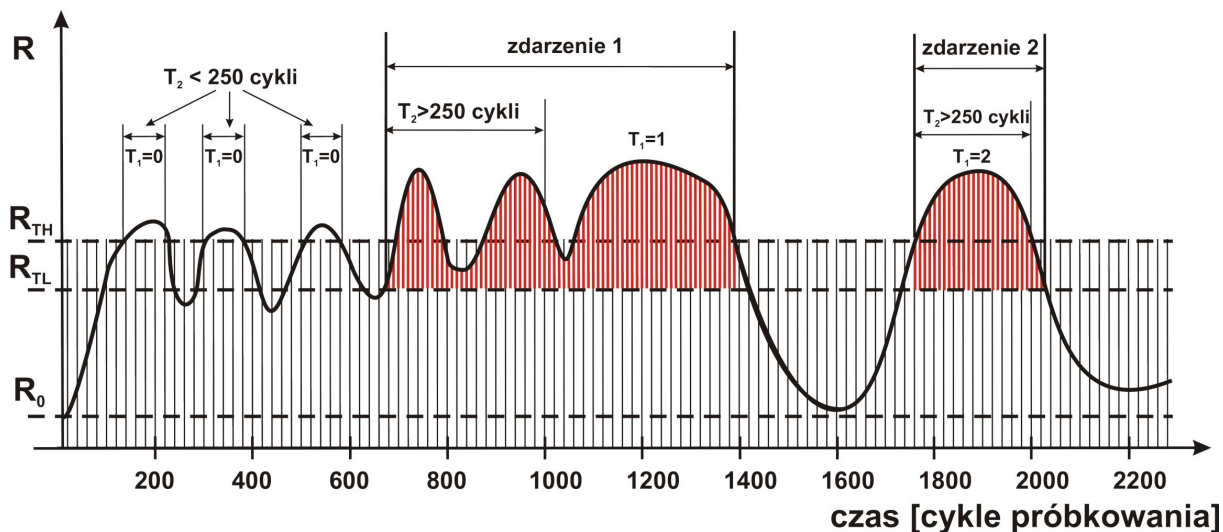


Rysunek 8.25: Detekcja zdarzeń wg prostego algorytmu nieodpornego na zaszumienie sygnału analogowego (zarejestrowano 7 zdarzeń)

Wartość progową R_T ustala się na podstawie wartości początkowej rezystancji R_0 . Wartość licznika T_1 określa liczbę zdarzeń bieżącego cyklu pomiarowego.

W celu zmniejszenia szumów zamiast jednej wartości progowej R_T wprowadzono dwie wartości progowe rezystancji R_{TH} i R_{TL} , których wartość również ustala się na podstawie wartości początkowej rezystancji R_0 oraz licznik T_2 . Na rysunku 8.26 pokazano schemat działania opracowanego rozbudowanego algorytmu detekcji zdarzeń pojedynczego kanału

[133].



Rysunek 8.26: Detekcja zdarzeń wg rozbudowanego algorytmu odpornego na zaszumienie sygnału analogowego (zarejestrowano 2 zdarzenia przy wartości progowej licznika T_2 równej 250)

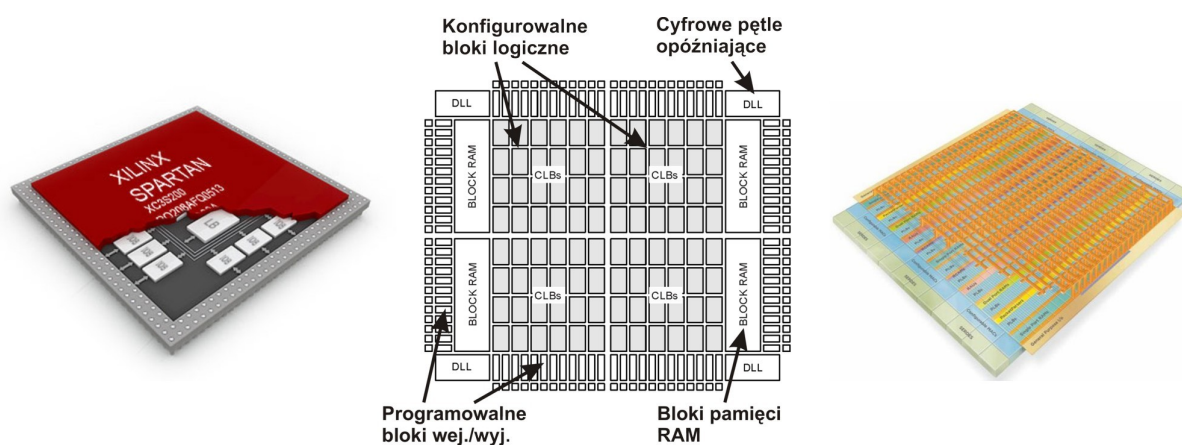
W momencie, gdy wartość mierzonej rezystancji przekracza wartość progową R_{TH} , startuje licznik T_2 . Licznik jest zwiększany o jeden (inkrementowany) dopóki wartość mierzonej rezystancji jest większa niż wartość progowa R_{TH} . Jeżeli wartość rezystancji spada poniżej wartości R_{TH} , ale nadal jest większa od wartości progowej R_{TL} , licznik zatrzymuje się. Jeżeli rezystancja spada poniżej wartości R_{TL} , licznik jest zmniejszany o jeden (dekrementowany). Wystąpienie zdarzenia jest archiwizowane w momencie, gdy licznik T_2 przekracza wartość progową oznaczającą wystąpienie zdarzenia (np. 20 μ s). Zdarzenie jest uznawane za zakończone w momencie, gdy rezystancja spada poniżej R_{TL} i pozostaje do czasu aż licznik T_2 w wyniku dekrementacji osiągnie wartość progową oznaczającą koniec zdarzenia. Wartości progowe rezystancji oraz wartości progowe licznika T_2 ustalane są za pomocą aplikacji użytkownika i przechowywane w rejestrach struktur FPGA. Wartości R_{TH} oraz R_{TL} mogą być określone niezależnie dla każdego z badanych kanałów na podstawie wartości ich rezystancji początkowych R_0 (np. odpowiednio 600% i 500% wartości R_0) lub przybierać wspólną wartość dla wszystkich kanałów. Wartości progowe licznika T_2 (determinujące czas trwania najkrótszego wykrywalnego zdarzenia) określa się na podstawie parametrów testu niezawodności oraz przewidywanej częstotliwości rezonansowej drgań pękniętych złączy. Zawartość rejestrów można zmieniać w dowolnym momencie trwania testu bez konieczności przerywania pomiarów.

W strukturach FPGA zaimplementowano dwa niezależne procesy. Pierwszy proces odpowiedzialny jest za wstępne przetwarzanie danych pomiarowych. Proces taktowany jest

zegarem o częstotliwości 10 MHz. Proces jest stale aktywny - pracuje w tle operacji związanych z drugim procesem, odpowiedzialnym za komunikację z komputerem, programowanie źródeł oraz kontrolę stanów struktury FPGA. Drugi proces taktowany jest zegarem o częstotliwości 10 kHz. Aktywność procesu uzależniona jest od instrukcji sterujących wysyłanych za pomocą magistrali sterującej [133].

8.4.5 Procedura implementacji algorytmu w strukturach FPGA

Zastosowane matryce programowalne SPARTAN II firmy Xilinx, zawierające 200000 bramek logicznych, umożliwiły implementację opracowanego złożonego algorytmu detekcji zdarzeń. Schemat blokowy struktury FPGA rodziny SPARTAN II pokazano na rysunku 8.27 [136].

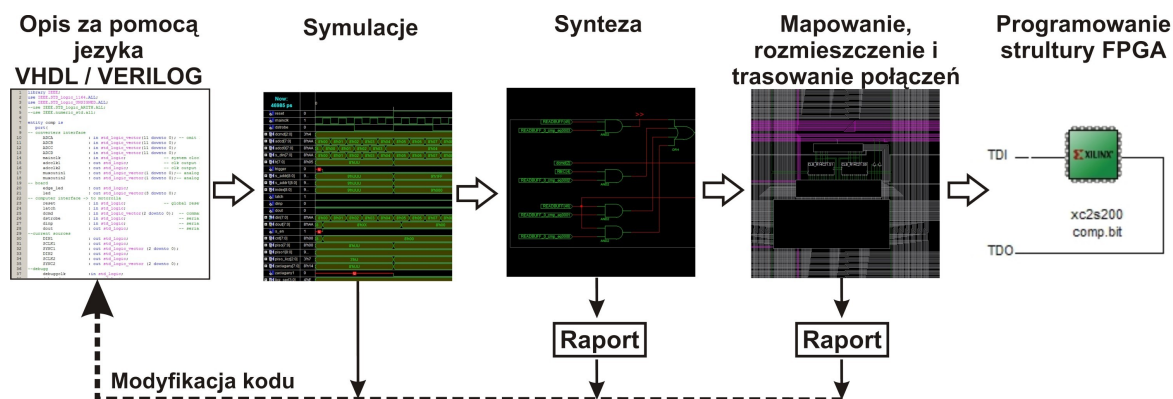


Rysunek 8.27: Uproszczony schemat blokowy struktury FPGA rodziny SPARTAN II [136]

W opracowanym systemie struktury FPGA pełnią jednocześnie funkcję wykonawczą oraz sterującą. Wybrano matryce programowalne ze względu na:

- wysoką wydajność wynikającą z równoległej architektury oraz dużych zasobów wewnętrznych rejestrów,
- możliwość wielokrotnego programowania przez użytkownika końcowego (wielokrotna implementacja algorytmu),
- możliwość zmiany funkcjonalności systemu (zmiana algorytmu) bez konieczności wprowadzania zmian sprzętowych,
- stosunkowo niewielki ich koszt w porównaniu do struktur ASIC (ang. Application Specific Integrated Circuit), które projektowane są do realizacji z góry określonego zadania.

Algorytm detekcji zdarzeń zaimplementowano w układach FPGA za pomocą języka VHDL (ang. Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language). VHDL jest językiem opisu sprzętu używanym w komputerowym projektowaniu układów cyfrowych typu FPGA oraz ASIC. Implementacja projektu (algorytmu) w strukturze FPGA jest procesem wieloetapowym. Główne etapy procesu implementacji pokazano na rysunku 8.28.



Rysunek 8.28: Główne etapy procesu implementacji projektu w strukturze FPGA

Przed przystąpieniem do implementacji opracowano specyfikację obejmującą założenia i wymagania projektowe. Specyfikacja przybrała formę listy funkcji układu, rysunków, schematów oraz grafów, opisujących jednoznacznie projektowany układ oraz jego działanie.

Podczas kompilacji opracowany kod poddany został sprawdzeniu pod kątem składni języka. Po uzyskaniu poprawnego wyniku kompilacji projekt poddano wstępnym symulacjom za pomocą opracowanych programów testowych. Programy testowe napisane w języku opisu sprzętu zapewniają wirtualne otoczenie, które symuluje rzeczywiste warunki w jakich będzie pracował projektowany układ. Testowanie i symulacja na tym poziomie jest symulacją funkcjonalną i sprowadza się do dostarczenia sygnałów zewnętrznych i zdarzeń do projektowanego układu oraz analizy odpowiedzi układu na te pobudzenia.

Po przeprowadzeniu wstępnych symulacji i osiągnięciu założonych wymagań co do funkcji realizowanej przez projektowany układ przeprowadzano syntezy. Podczas syntezy pliki z opisem projektu konwertowane były do postaci wspólnego formatu listy połączeń. Podczas kolejnych etapów pliki listy połączeń były scalane, pozbawiane hierarchii oraz poddawane wielopoziomowej optymalizacji logicznej, mającej na celu zminimalizowanie liczby wykorzystywanych bloków. Jako kryterium optymalizacji przyjęto szybkość działania oraz wykorzystanie powierzchni układu scalonego. Możliwe jest również przeprowadzenie optymalizacji pod kątem zużycia energii lub łatwości testowania. Kolejnym etapem implementacji było dopasowanie funkcji logicznych do struktury programowalnej.

W przypadku układów FPGA proces dopasowania składał się z trzech kolejnych etapów: mapowania bramek logicznych, rozmieszczania bloków oraz trasowania połączeń [137].

Po ustaleniu rozmieszczenia bloków i połączeń przeprowadzono symulację czasową układu, uwzględniającą opóźnienia wnoszone przez poszczególne elementy układu programowalnego. W przypadku uzyskania zadowalających rezultatów tworzono plik konfiguracyjny i programowano układ w celu sprawdzenia poprawności działania w rzeczywistych warunkach pracy.

Opracowany algorytm detekcji zdarzeń zaimplementowano za pomocą zintegrowanego środowiska XILINX ISE, zapewniającego pełną automatyzację procesu implementacji począwszy od syntezy. Procedury syntezy i optymalizacji przeprowadzono każdorazowo po wniesieniu poprawki do kodu. Poprawki wnoszono wielokrotnie podczas tworzenia opisu jak również testowania i kalibracji systemu. Ze względu na złożoność opracowanego algorytmu detekcji zdarzeń procesy syntezy oraz optymalizacji były czasochłonne. W celu ich przyspieszenia zastosowano wieloprocesorowy system komputerowy. Mimo zastosowania systemów o dużej mocy obliczeniowej, średni czas syntezy oraz implementacji wynosił około 10 minut, co przy kilkuset procesach syntezy i optymalizacji istotnie wydłużyło prace nad uruchomieniem systemu.

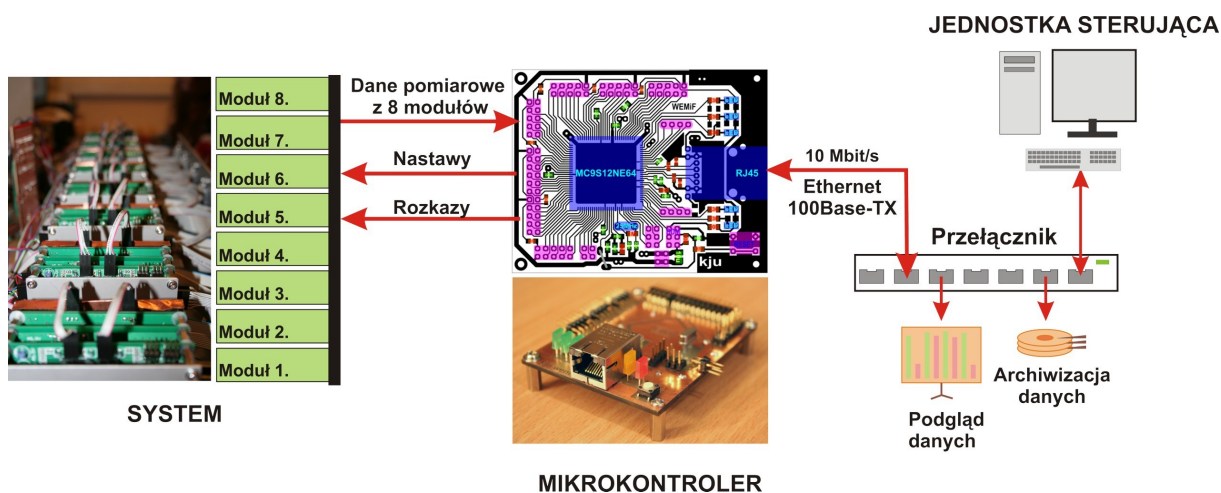
W celu usprawnienia procesów testowania i kalibracji systemu zastosowano specjalnie opracowane metody analizy stanu rejestrów wewnętrznych, polegające na analizie sprzętowej (debugowaniu sprzętowym).

8.4.6 Komunikacja między systemem a komputerem

Interfejs między komputerem a systemem diagnostyczno-pomiarowym stanowi mikrokontroler sieciowy NE64 firmy Freescale podłączany do komputera bezpośrednio kablem Ethernet standardu 100 Base-T opisanym w specyfikacji IEEE 802.3 lub za pomocą urządzeń pracujących w sieciach LAN (np. przełączników, koncentratorów). Schemat interfejsu zaprezentowano na rysunku 8.29.

Biorąc pod uwagę szacowaną ilość danych generowanych przez system pomiarowy oczekiwaną przepustowość kanału komunikacyjnego między częścią pomiarową a komputerem PC ustalono na 10 Mbit/s. Wprawdzie podobne wartości przepustowości są możliwe do osiągnięcia za pomocą innych popularnych standardów komunikacyjnych (np. GPIB czy USB), jednak z punktu widzenia kosztów implementacji każdego z tych rozwiązań standard Ethernet okazuje się być rozwiązaniem zdecydowanie najtańszym. Składa się na to

z jednej strony jego duża popularność, a co za tym idzie obecność infrastruktury sieciowej biernej (okablowanie) i aktywnej (przełączniki, koncentratory) w większości laboratoriów, z drugiej strony natomiast niski koszt specjalistycznych mikrokontrolerów z zaimplementowanym kontrolerem Ethernet.



Rysunek 8.29: Dwukierunkowa komunikacja między systemem diagnostyczno-pomiarowym a jednostką sterującą (komputerem) z użyciem mikrokontrolera

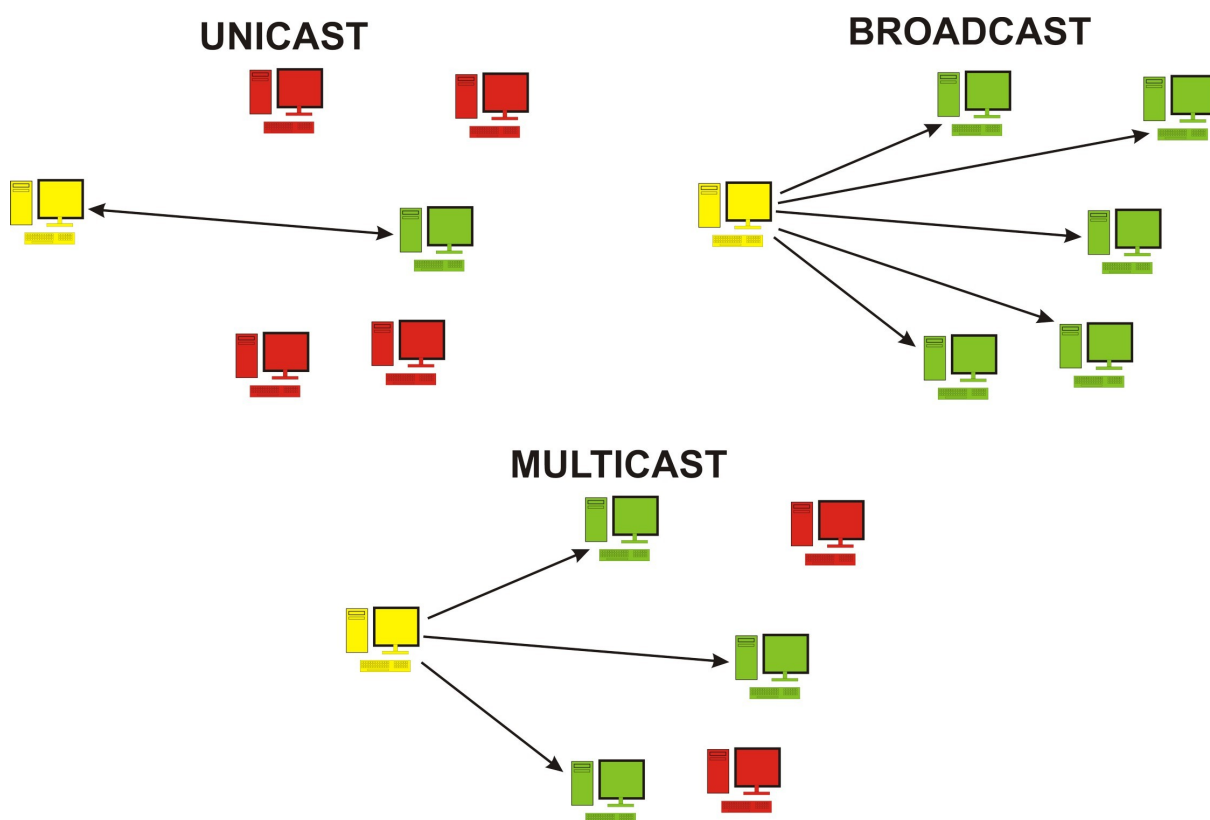
Zgodnie z ogólnie przyjętym warstwowym modelem ISO/OSI, opisującym strukturę komunikacji sieciowej, w sieci Ethernet transmisja danych jest możliwa w oparciu o jeden z dostępnych protokołów komunikacyjnych z warstwy czwartej tego modelu, tj. z warstwy transportowej. Dwa najpopularniejsze protokoły tej warstwy to protokół kontroli transmisji TCP (ang. Transmission Control Protocol) oraz datagramowy protokół użytkownika UDP (ang. User Datagram Protocol), zasadniczo się od siebie różniące [88].

W standardowych zastosowaniach przyjęło się, że protokół TCP gwarantuje większą pewność transmisji ze względu na zestawianie połączenia między urządzeniem nadającym a odbierającym, jak również ze względu na kontrolę transmisji danych i potwierdzenia dotarcia poszczególnych pakietów. Transmisja TCP z reguły jest transmisją typu unicast, czyli transmisją z jednego źródła do jednego adresu docelowego.

Protokół UDP, zwany datagramowym, jest maksymalnie uproszczony, a transmisja UDP jest jednokierunkowa. Między urządzeniami biorącymi udział w transmisji połączenie nie jest zestawiane. Ponadto protokół nie ma zaimplementowanych potwierdzeń. Zaletą protokołu UDP jest natomiast to, że jest on szybszy od protokołu TCP (nie ma narzutu związanego z zestawianiem połączenia) oraz fakt, iż z programistycznego punktu widzenia jest on dużo łatwiejszy w implementacji. Ponieważ protokół UDP jest protokołem bezpołączeniowym, z powodzeniem można w nim realizować transmisję w trybie broadcast (rozsiewczym) oraz

multicast. Różnice między transmisją w trybie unicast, broadcast i multicast przedstawiono schematycznie na rysunku 8.30. W trybie unicast nadawca (żółty) komunikuje się tylko z jednym odbiorcą (zielony), podczas gdy w trybie broadcast wysyła pakiety do wszystkich komputerów podłączonych do sieci komputerowej (zielone), natomiast w trybie multicast wysyła pakiety tylko do wybranych komputerów (zielone) podłączonych do sieci.

W systemie pomiarowym zdecydowano się na użycie protokołu UDP. Jednak z uwagi na jego wyżej wymienione ograniczenia dodano programowo kontrolę przesyłanych danych i potwierdzenia. Użycie protokołu UDP umożliwiło jednoczesny odbiór danych pomiarowych przez dowolną liczbę urządzeń sieciowych, bez ich wzajemnej interakcji. Dzięki temu niezależnie od siebie można śledzić bieżące wyniki pomiarów, archiwizować dane, konfigurować system pomiarowy i wizualizować wyniki [138]. Istnieje możliwość prowadzenia wyżej wymienionych czynności wykorzystując globalną ogólnosiwiatową sieć komputerową Internet.



Rysunek 8.30: Schemat transmisji unicast, broadcast, multicast (kolorem żółtym oznaczono nadawcę, kolorem zielonym odbiorców)

8.4.7 Problem połączenia okablowania pomiarowego z płytką testową poddawaną wibracjom losowym

W przypadku pełnego wykorzystania możliwości pomiarowych systemu podczas

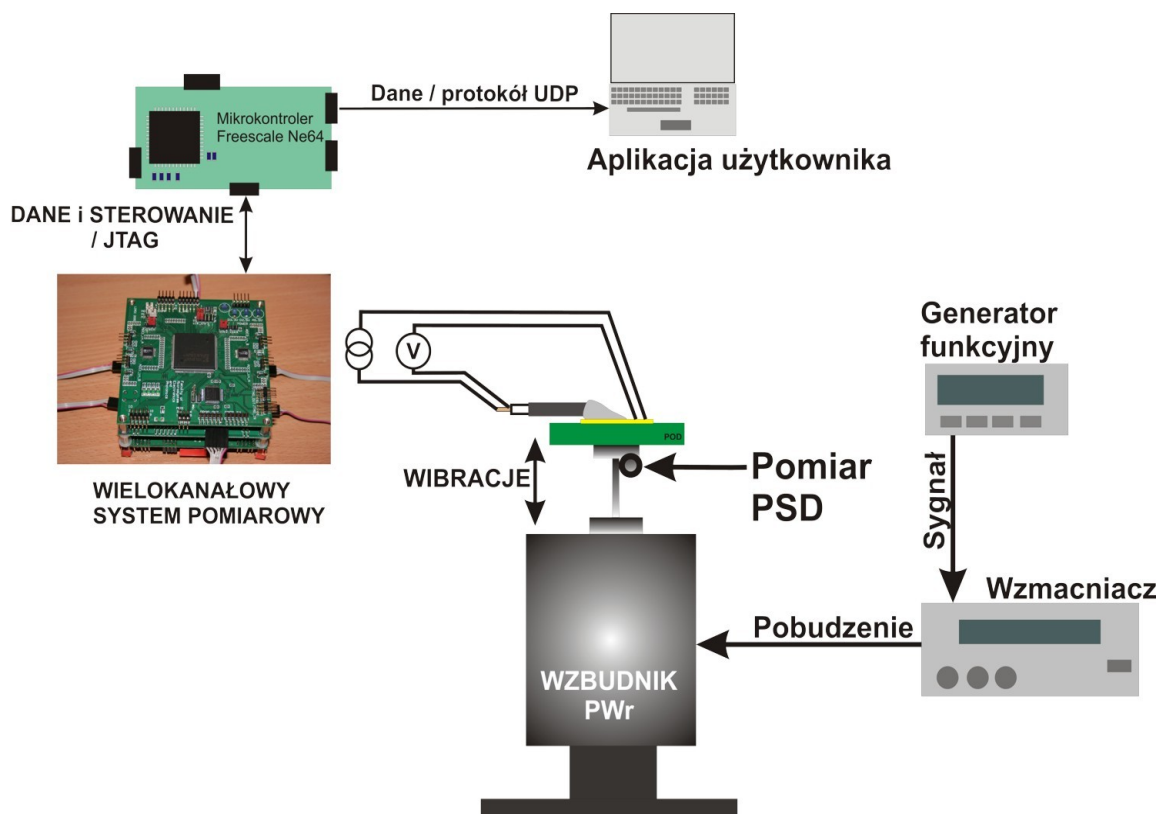
przebiegach testów niezawodności badane płytki połączone są z systemem pomiarowym kablami jednożyłowymi o długości około 1 m. W celu zapewnienia wysokiej jakości i niezakłóconej transmisji danych w sytuacji, gdy badana płytka podlega narażeniom termicznym i wibracjom powinny być spełnione dwa warunki:

- przewody powinny być wytrzymałe mechanicznie i przesyłać sygnał bez zakłóceń i szumów,
- połączenia elektryczne przewodów z badaną płytką powinny być niezawodne.

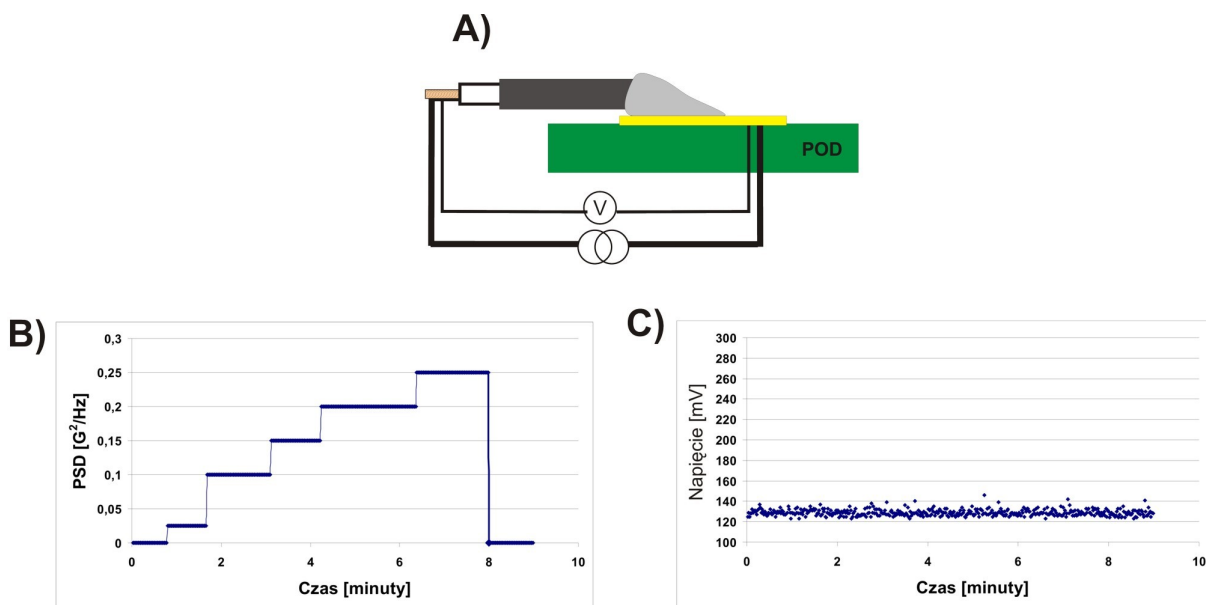
Dla spełnienia pierwszego z warunków zastosowano kable zawierające przewody w postaci linki w izolacji teflonowej, ekranowane opłotem z drutów srebrnych. Izolacja teflonowa zapewnia wysoką odporność przewodów na działanie wibracji oraz cyklicznie zmieniającej się temperatury. Ekran minimalizuje efekt zakłóceń wywołanych transmisją sygnałów o wysokiej częstotliwości oraz przez pracujące w sąsiedztwie urządzenia.

Drugi z wymienionych wyżej warunków jest trudniejszy do spełnienia ze względu na to, że mimo zastosowania kabli o możliwie najmniejszej średnicy, wiązka 256 kabli ma łączną masę około 4 kg. Zastosowanie uchwytów i wysięgników ograniczyło wprawdzie bezpośredni wpływ tak dużej masy na strefę przyłączy do płytki, jednak bez wątpienia niewłaściwy sposób połączenia kabli z płytką poddawaną wibracjom skutkuje występowaniem zakłóceń podczas pomiarów napięcia lub całkowitą destrukcją tych połączeń.

Rozważano dwa sposoby połączenia kabli z płytką obwodu drukowanego, nierozłączny i rozłączny. Pierwszy sposób polega na przylutowywaniu przewodów do pól lutowniczych rozmieszczonych na powierzchni testowanych płytek. Przeplot przewodu przez kilka otworów metalizowanych oraz zalanie otworów ciekłym lutem zapewnia trwałe kontakty elektryczne. Niezawodność takiego połączenia w warunkach wibracji badano w stanowisku diagnostyczno-pomiarowym (rysunek 8.31), natomiast schemat pomiarowy badanego połączenia lutowanego oraz wyniki badań pokazano na rysunku 8.32.



Rysunek 8.31: Schemat stanowiska umożliwiającego przeprowadzanie testów elektrycznych złączy lutowanych oraz rozłącznych poddawanych wibracjom



Rysunek 8.32 Badanie wpływu wibracji na spadek napięcia na połączeniu lutowanym : A) przyłutowany przewód, B) wykres poziomu gęstości mocy wibracji losowych, C) wykres wartości napięcia zmierzonego podczas badań

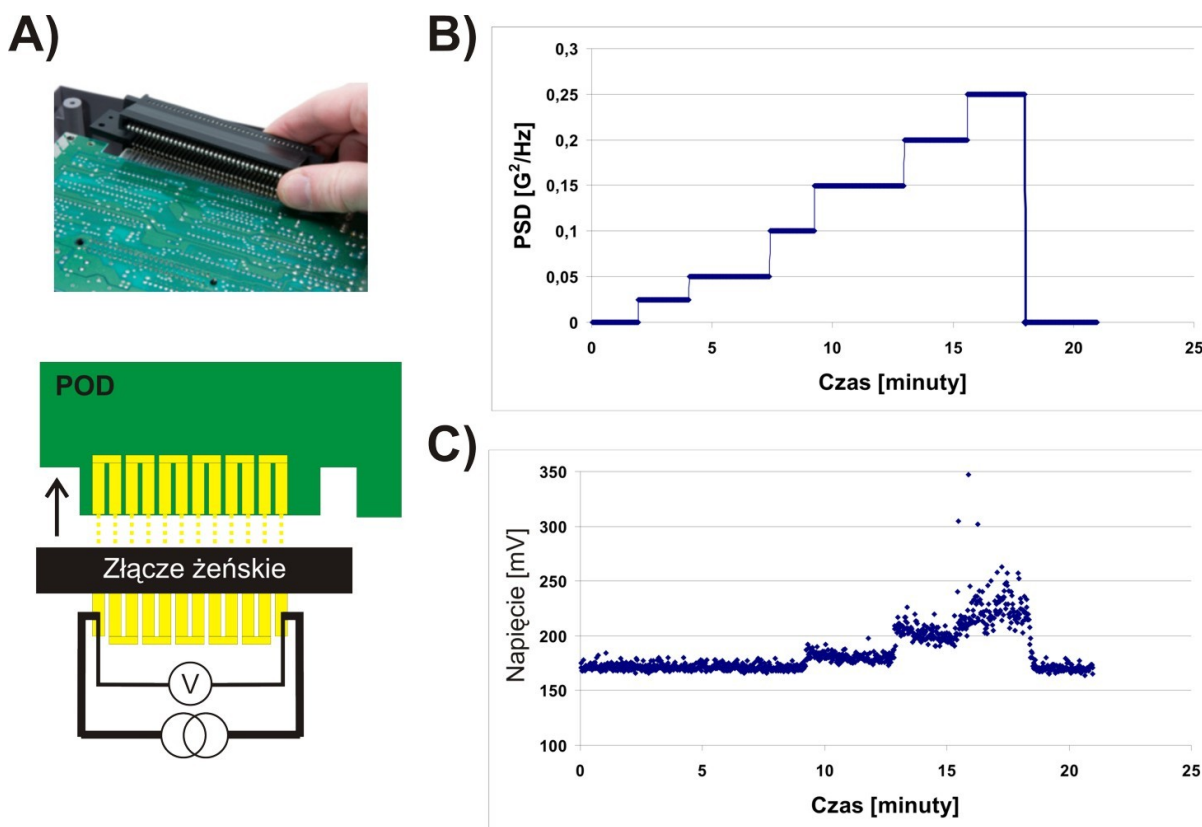
Zastosowano wibracje losowe o częstotliwościach z zakresu 50–500 Hz a podczas badań

w stałych odstępach czasu zwiększano gęstość widmową mocy drgań, której wartość określano na podstawie wartości przyspieszenia skutecznego mierzonego w pobliżu złącza (rysunek 8.31). Jak widać (rysunek 8.32), nie stwierdzono zmian wartości mierzonego napięcia. Wskazuje to na stabilność wartości rezystancji i przydatność złącza do badań niezawodnościowych niezależnie od poziomu gęstości widmowej mocy drgań, którym jest poddawane. Niestety, czas potrzebny na preparację i przylutowanie 256 przewodów przy wymianie płytek wynosi kilka godzin i jest wielokrotnie dłuższy niż w przypadku stosowania złączy rozłącznych (kilka minut). Ponadto zastosowanie złączy rozłącznych umożliwia wielokrotne podłączenie okablowania do testowanych płytek bez ryzyka uszkodzenia przewodów i w konsekwencji konieczności ich wymiany.

W stanowisku diagnostyczno-pomiarowym (rysunek 8.31) przeprowadzono badania wpływu wibracji losowych o częstotliwościach z zakresu 50–500 Hz na rozłączne złącze D-sub (ang. D-subminiature), złącze Centronics oraz złącze krawędziowe. Wyprowadzenia badanych złączy męskich i żeńskich zwarto na przemian przylutowując zwory, uzyskując tym samym łańcuch kilkudziesięciu połączeń rozłącznych. W takim układzie zmiana wartości mierzonego napięcia jest konsekwencją zmiany rezystancji badanego łańcucha złączy rozłącznych, przez który przepływa prąd o stałej wartości. Podobnie jak w przypadku połączeń lutowanych w stałych odstępach czasu zwiększano gęstość widmową mocy drgań, której wartość określano na podstawie wartości przyspieszenia skutecznego mierzonego u nasady uchwytu. Wyniki przedstawiono na rysunkach 8.33, 8.34 oraz 8.35.

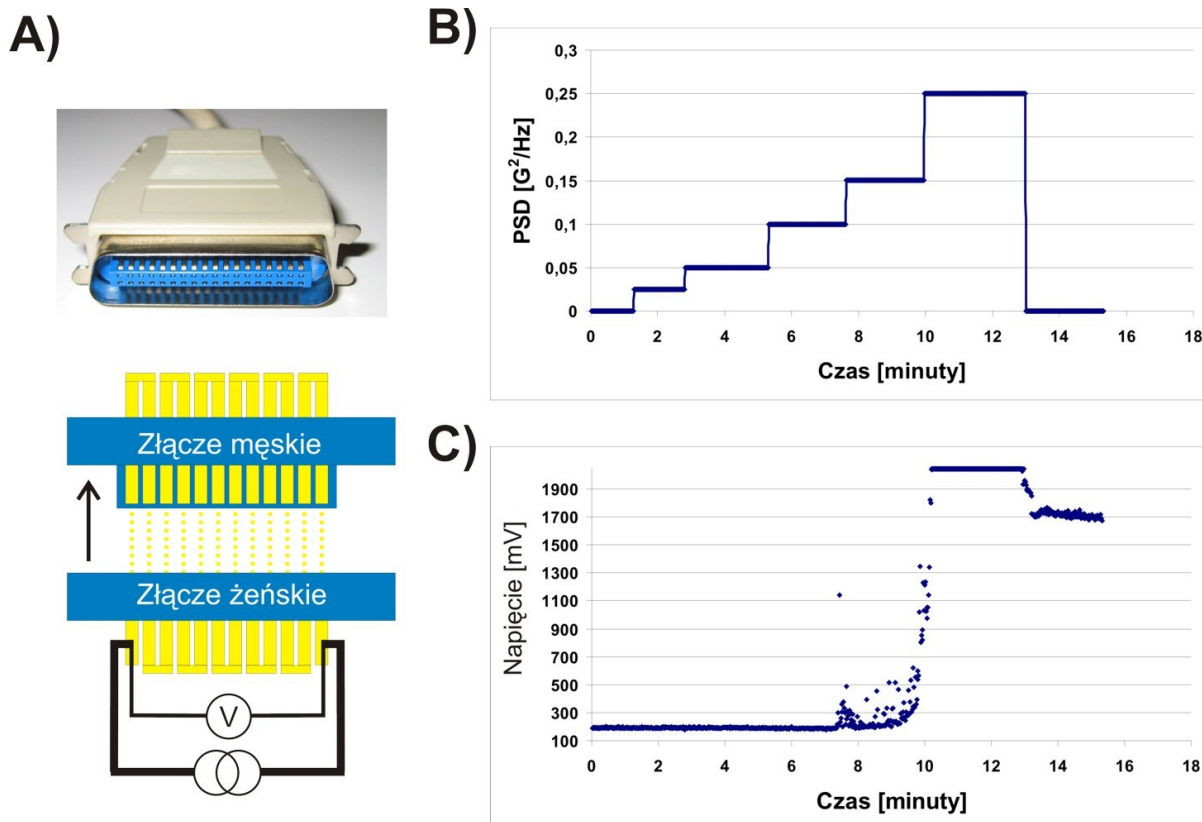
Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno złącza krawędziowe jak i Centronics poddawane wibracjom losowym nie stanowią stabilnego kontaktu elektrycznego o stałej wartości rezystancji.

Badając złącze krawędziowe (rysunek 8.33) zaobserwowano wzrost wartości mierzonego napięcia, gdy gęstość widmowa mocy wibracji nasady uchwytu przekroczyła wartość $0,15 \text{ g}^2/\text{Hz}$. Wartość mierzonego napięcia rosła wraz z dalszym wzrostem gęstości widmowej mocy drgań. Po ustaniu drgań wartość mierzonego napięcia osiągnęła wartość początkową.



Rysunek 8.33: Badanie wpływu wibracji losowych na spadek napięcia na złączu krawędziowym (łańcuchu połączeń) : A) złącze, B) wykres poziomu gęstości mocy wibracji losowych, C) wykres wartości napięcia zmierzonego podczas badań

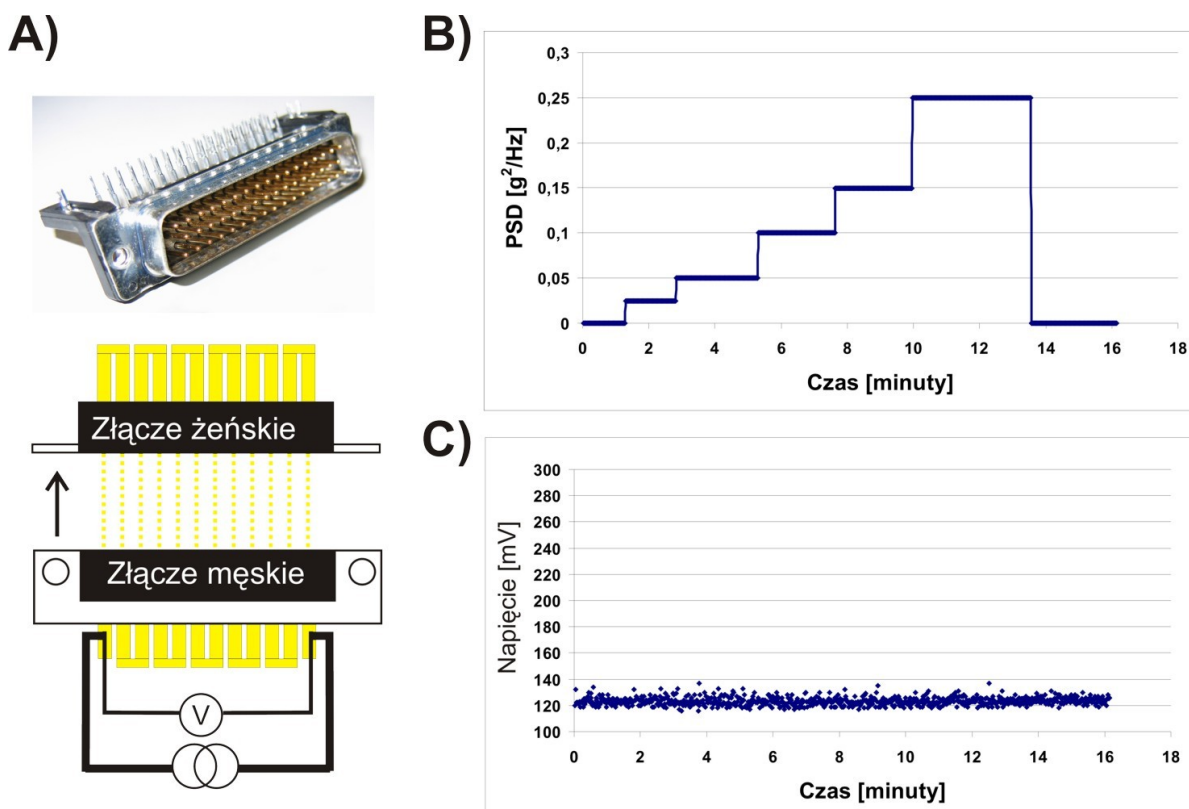
W przeciwieństwie do złącza krawędziowego, które mimo wzrostu rezystancji zapewniało połączenie elektryczne w całym zakresie gęstości widmowej mocy wibracji, złącze Centronics przestało przewodzić prąd elektryczny, gdy gęstość widmowa mocy drgań przekroczyła wartość $0,25 g^2/Hz$ (rysunek 8.34) . W zakresie $0,15-0,25 g^2/Hz$ obserwowano chwilowe zmiany napięcia (iskrzyenie). Po ustaniu drgań wartość mierzonego napięcia była kilkunastokrotnie wyższa od wartości początkowej.



Rysunek 8.34: Badanie wpływu wibracji losowych na spadek napięcia na złączu Centronics (łańcuchu połączeń): A) złącze, B) wykres poziomu gęstości mocy wibracji losowych, C) wykres wartości napięcia zmierzonego podczas badań

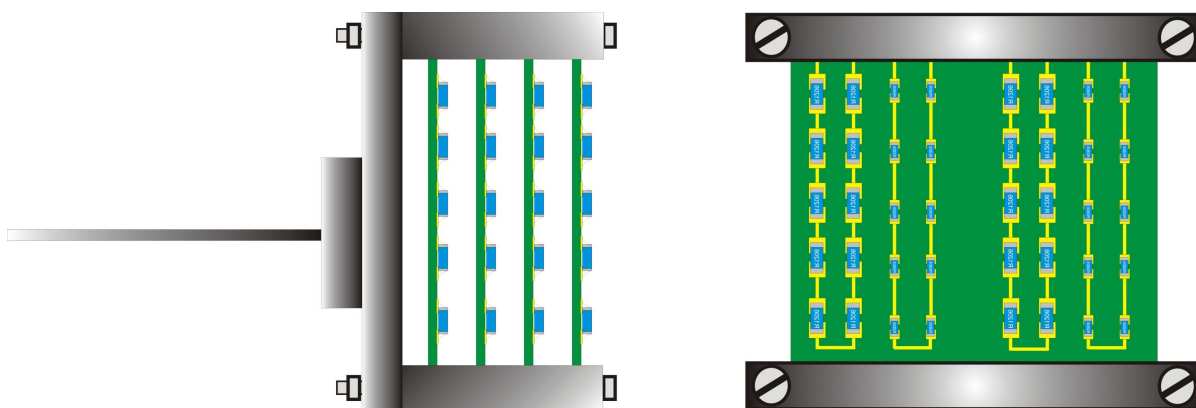
Oba badane typy złączy nie powinny być stosowane jako połączenia okablowania pomiarowego z urządzeniami lub płytkami poddawanych wibracjom podczas testów niezawodności. Skutkiem zmiany poziomu sygnału, która wynika z zaniku kontaktu między przewodzącymi elementami złącza męskiego i żeńskiego może być wypaczenie wyniku końcowego testu niezawodności. Zakres stosowania badanych złączy ogranicza się do warunków pracy, w których gęstość widmowa mocy drgań losowych nie przekracza $0,1 g^2/Hz$.

Dalsze badania wykazały, że złącze D-sub zapewnia stabilny kontakt elektryczny, którego rezystancja nie uległa zmianom pod wpływem wibracji losowych, niezależnie od gęstości widmowej mocy wibracji (rysunek 8.35). Podobnie jak podczas badania złącza lutowanego, poziom mierzonego spadku napięcia na złączu D-sub nie uległ zmianie.



Rysunek 8.35: Badanie wpływu wibracji losowych na spadek napięcia na złączu D-sub (łańcuchu połączeń): A) złącze, B) wykres poziomo gęstości mocy wibracji losowych, C) wykres wartości napięcia zmierzonego podczas badań

W oparciu o przeprowadzone badania do podłączenia okablowania pomiarowego systemu do płytek testowych użyto złącza rozłączne kołkowe D-sub. Złącza żeńskie D-sub przylutowano ręcznie do płytek testowych za pomocą eutektycznego stopu SnPb. W celu zabezpieczenia wykonanych połączeń przed pękaniem podczas testu niezawodności (narażenie na wibracje), złącza zaciśnięto między elementami konstrukcyjnymi zaprojektowanego dedykowanego uchwytu. Uchwyt składający się z ceowników wykonanych z duraluminium pokazano na rysunku 8.36.



Rysunek 8.36: Widok uchwytu używanego podczas badań, w którym zaciśnięto cztery płytki testowe

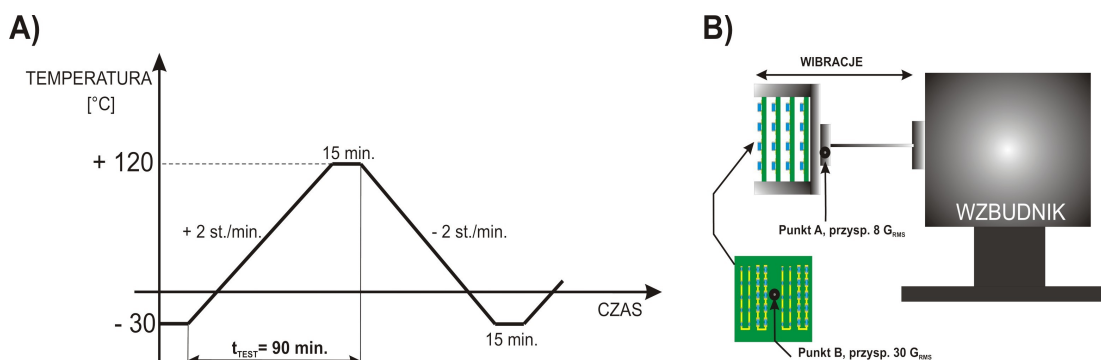
W celu przyspieszenia badań zaprojektowany uchwyt przewiduje zaciśnięcie jednocześnie 4 płytek testowych, co pozwala na poddanie ich takim samym narażeniom. Masa uchwytu z zamontowanymi 4 płytkami testowymi wynosi 900 g. Miejsce połączenia okablowania ze złączem męskim zalano żywicą epoksydową w celu zabezpieczenia okablowania przed destrukcyjnym działaniem wibrującej płytki. Przeprowadzone wstępne testy potwierdziły, iż konstrukcja uchwytu, złącza D-sub oraz żywica epoksydowa zapewniają wytrzymałość i odporne na wibracje oraz cykliczne zmiany temperatury połączenie między płytkami testowymi a okablowaniem systemu pomiarowego.

8.5 Przyspieszone testy niezawodności złączy lutowanych

8.5.1 Procedura prowadzenia testów

Do analizy porównawczej wytrzymałości zmęczeniowej badanych złączy lutowanych przeprowadzono przyspieszone testy niezawodności polegające na poddaniu ich jednoczesnym narażeniom termicznym i wibracjom. W tym celu wybrano po jednym egzemplarzu płytki testowej reprezentującym każdą z badanych konfiguracji materiałowych. Badaniami objęto złącza lutowane stopami bezołowiowymi SAC A, SAC B, Sn100C, a jako kryterium porównawcze oceny złączy lutowanych stopami bezołowiowymi przyjęto wytrzymałość zmęczeniową złączy lutowanych stopem ołowiowym. W celu określenia wpływu grubości oraz różnorodności faz międzymetalicznych na wytrzymałość zmęczeniową złączy testami niezawodności objęto również płytki poddane wcześniej procesom starzenia przez 300 oraz 600 godzin w temperaturze 150°C.

Test niezawodności każdej z badanych płytek trwał nieprzerwanie 144 godziny. Podczas testu płytki poddawane były 48 cyklom temperaturowym oraz wibracjom losowym o częstotliwościach z zakresu 50-500 Hz. Pojedynczy cykl temperaturowy trwał 180 minut. Podczas cyklu temperaturowego temperatura w komorze klimatycznej osiągała skrajne wartości równe -30 oraz +120°C, a gradient wzrostu i opadania temperatury wynosił $\pm 2^\circ\text{C}/\text{min}$. (rysunek 8.37A). Przyspieszenie skuteczne u nasady uchwytu (punkt A na rysunku 8.37B) wynosiło 8 g_{RMS} (PSD = 0,14 g^2/Hz), natomiast w punkcie centralnym płytki (punkt B) wynosiło 30 g_{RMS} (PSD = 2 g^2/Hz).



Rysunek 8.37: Warunki przyspieszonego testu niezawodności badanych złączy lutowanych: A) cykl temperaturowy, B) przyspieszenie wynikające z drgań losowych

Przyspieszonym testom niezawodności nie poddano złączy lutowanych stopem niskotemperaturowym (zawierającym bizmut), ze względu na zbyt niską temperaturę topnienia tego stopu (138°C). Podczas wstępnych testów stwierdzono bowiem, że dla maksymalnej temperatury cyklu wibracje powodują znaczące uszkodzenia złączy wykonanych stopem Bi42Sn co wyklucza ich porównanie z innymi typami badanych połączeń.

Płytki testowe podzielono na trzy grupy według rodzaju powłok ochronnych:

- I grupa - płytki, których pola lutownicze pokryto powłoką cyny immersyjnej (ImSn),
- II grupa - płytki, których pola lutownicze pokryto powłoką złota immersyjnego na warstwie niklu nakładanego metodą bezprądową (ENIG),
- III grupa - płytki, których pola lutownicze pokryto powłoką bezołowiowego stopu lutowniczego (HASL).

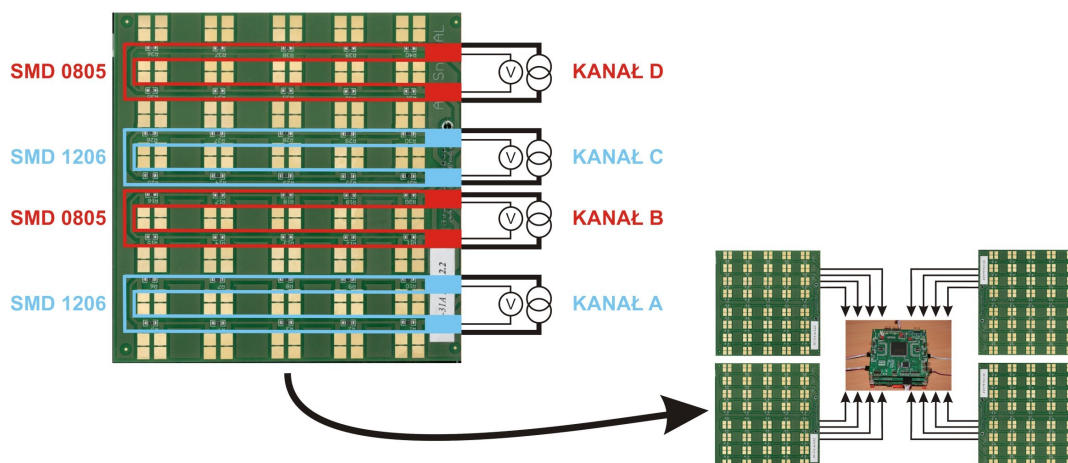
Podczas każdego testu badano jednocześnie 4 płytki testowe różniące się stopem lutowniczym użytym do wykonania złączy (ołowiowy oraz bezołowiowe SAC A, SAC B oraz SN100C).

Wykonano trzy serie przyspieszonych testów niezawodności. W serii pierwszej badaniami objęto złącza lutowane, które nie zostały poddane procesom starzenia. Testy przeprowadzono w następującej kolejności:

- test nr 1: złącza na powłokach ImSn (I grupa),
- test nr 2: złącza na powłokach ENIG (II grupa),
- test nr 3: złącza na powłokach HASL (III grupa).

Złącza lutowane poddane starzeniu przez 300 oraz przez 600 godzin zbadano odpowiednio podczas drugiej oraz trzeciej serii. W sumie przeprowadzono 9 testów niezawodności,

podczas których poddano testom 36 płytek monitorując rezystancję 144 kanałów (łańcuchów szeregowo połączonych złączy). Łącznie zbadano 2880 złączy lutowanych (720 przylutowanych zwór SMD 1206 oraz 720 przylutowanych zwór SMD 0805). Rozmieszczenie na powierzchni płytki testowej czterech łańcuchów złączy oraz zasadę pomiaru rezystancji 16 kanałów pokazano na rysunku 8.38.



Rysunek 8.38: Zasada pomiaru rezystancji 16 kanałów (łańcuchów złączy lutowanych) podczas przyspieszonego testu niezawodności

Podczas testu niezawodności system diagnostyczno-pomiarowy mierzy rezystancję każdego z 16 kanałów z częstotliwością 1,25 MHz. Oznacza to, że podczas testów niezawodności system przeprowadzono łącznie $9,33 \cdot 10^{13}$ pomiarów rezystancji. Analizę porównawczą przeprowadzono w oparciu o dane zarchiwizowane przez system diagnostyczno-pomiarowy obejmujące:

- wartości maksymalne rezystancji zarejestrowane podczas każdego cyklu pomiarowego,
- liczbę zdarzeń zarejestrowanych podczas każdego cyklu pomiarowego.

Zdarzenie zdefiniowano jako trwający co najmniej 20 μ s wzrost rezystancji powyżej określonej wartości progowej. Rezystancja początkowa badanych łańcuchów złączy mierzona w temperaturze 20°C zawierała się w przedziale 500-700 m Ω . Za wartość progową rezystancji (powyżej której złącze uznawano za wadliwe, co określano jako zdarzenie) przyjęto 15-krotną wartość rezystancji początkowej. Tak więc maksymalna mierzalna wartość rezystancji wynikająca z zakresu pomiarowego wynosiła około 12 Ω .

8.5.2 Wyniki testów niezawodności złączy lutowanych

W tabeli 8.1 przedstawiono wyniki testów niezawodności poszczególnych łańcuchów

złączy, które nie zostały poddane procesom starzenia. Czas do wystąpienia pierwszego zdarzenia podczas testu wyrażono liczbą cykli temperaturowych. Puste pola tabeli („-”) oznaczają, że złącza łańcucha nie uległy uszkodzeniu podczas testu (rezystancja łańcucha nie przekroczyła wartości progowej).

Stop lutowniczy	Wielkość Elementów SMD	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka ImSn	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka ENIG	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka HASL
Ołowiowy Sn62Pb36Ag2.0 (KOKI)	1206	-	-	-
		-	-	-
	0805	-	-	-
		-	-	-
SAC B Sn96.5Ag3Cu0.5 (Cobar)	1206	19	6	33
		26	6	41
	0805	-	43	-
		25	42	-
SAC A Sn96.5/Ag3/Cu0.5 (KOKI)	1206	28	44	-
		-	43	-
	0805	-	-	-
		38	-	-
SN100C SNCu0.7Ni (Cobar)	1206	-	-	36
		-	-	29
	0805	-	-	-
		-	-	31

Tabela 8.1: Czas do wystąpienia pierwszego zdarzenia podczas testu niezawodności złączy lutowanych, których nie poddano procesom starzenia (48 łańcuchów)

Na podstawie uzyskanych wyników można wyróżnić następujące konfiguracje materiałowe:

- stop SN100C + powłoka ochronna pól lutowniczych ImSn,
- stop SN100C + powłoka ochronna pól lutowniczych ENIG,
- stop SAC A + powłoka ochronna pól lutowniczych HASL,

jako zalecane - zapewniające dobrą wytrzymałość zmęczeniową złączy lutowanych.

Wśród mało odpornych zestawów materiałowych, jako zdecydowanie niezalecane należy wyróżnić:

- stop SAC B + powłoka ochronna pól lutowniczych ENIG,
- stop SAC B + powłoka ochronna pól lutowniczych ImSn.

Zatem przez właściwy dobór stopu lutowniczego oraz powłoki ochronnej można zwiększyć wytrzymałość zmęczeniową bezołowiowych złączy lutowanych.

Wyniki testów niezawodności łańcuchów złączy, które poddano procesom starzenia przez

300 oraz 600 godzin przedstawiono odpowiednio w tabeli 8.2 oraz tabeli 8.3.

Stop lutowniczy	Wielkość Elementów SMD	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka ImSn	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka ENIG	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka HASL
Ołowiowy Sn62Pb36Ag2.0 (KOKI)	1206	-	-	-
		-	-	-
	0805	-	-	-
		-	-	-
SAC B Sn96.5Ag3Cu0.5 (Cobar)	1206	6	0,5	-
		8	2	-
	0805	5	6	-
		6	17	-
SAC A Sn96.5/Ag3/Cu0.5 (KOKI)	1206	31	3	1
		17	22	9
	0805	-	30	-
		17	40	4
SN100C SNCu0.7Ni (Cobar)	1206	22	35	38
		-	-	-
	0805	-	45	-
		-	-	47

Tabela 8.2: Czas do wystąpienia pierwszego zdarzenia podczas testu niezawodności złączy lutowanych, które poddano starzeniu przez 300 godzin (48 łańcuchów)

Stop lutowniczy	Wielkość Elementów SMD	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka ImSn	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka ENIG	Czas do wystąpienia zdarzenia [cykle temperaturowe] Powłoka HASL
Ołowiowy Sn62Pb36Ag2.0 (KOKI)	1206	-	6	-
		-	30	-
	0805	-	-	-
		-	-	-
SAC B Sn96.5Ag3Cu0.5 (Cobar)	1206	12	1	8
		9	1	-
	0805	21	9	-
		22	2	20
SAC A Sn96.5/Ag3/Cu0.5 (KOKI)	1206	5	-	39
		16	33	36
	0805	-	-	34
		15	-	15
SN100C SNCu0.7Ni (Cobar)	1206	15	-	20
		23	-	42
	0805	23	-	-
		23	-	-

Tabela 8.3: Czas do wystąpienia pierwszego zdarzenia podczas testu niezawodności złączy lutowanych, które poddano starzeniu przez 600 godzin (48 łańcuchów)

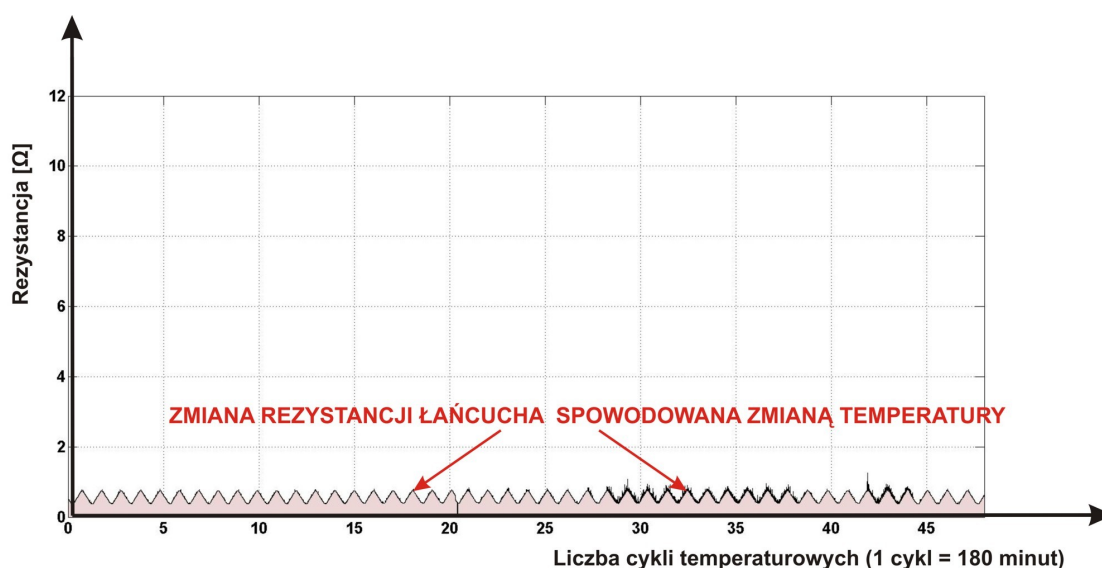
Analizując dane zebrane w tabeli 8.1, 8.2 oraz 8.3 można zauważyć, że łańcuchy zwór SMD 1206 ulegały uszkodzeniom znacznie częściej i szybciej niż łańcuchy zwór SMD 0805. Wymiary geometryczne elementów SMD mają istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową

złączy lutowanych. Inspekcja mikroskopowa oraz pomiary elektryczne wykazały, iż większość pękniętych złączy była zlokalizowana na obrzeżach płytek testowych, w miejscach gdzie występują największe naprężenia (rysunek 8.11).

W przypadku niektórych uszkodzonych łańcuchów pomiary rezystancji w warunkach statycznych nie wykazały całkowitych rozwarć obwodów elektrycznych ani wzrostu ich rezystancji, mimo że podczas testów niezawodności, gdy złącza poddawano wibracjom, system rejestrował zdarzenia i wzrost rezystancji łańcuchów. Dowodzi to celowości prowadzenia pomiarów rezystancji elektrycznej łańcuchów złączy podczas testu niezawodności.

8.5.3 Rezystancja złączy stabilnych

Wykres zmian rezystancji łańcucha złączy lutowanych, którego żadne złącze nie uległo pęknięciu w czasie testu niezawodności pokazano na rysunku 8.39.



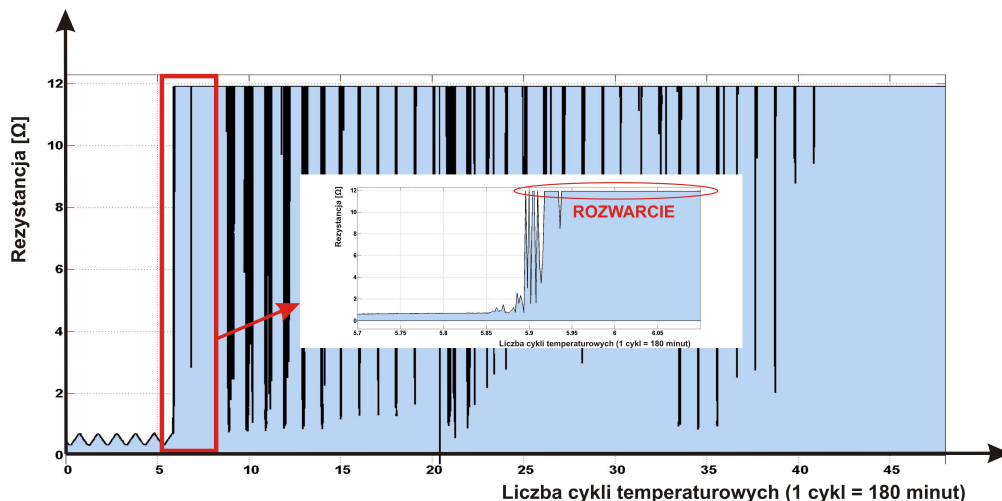
Rysunek 8.39: Wykres zmian rezystancji łańcucha złączy lutowanych (SMD 1206) stopem SN100C na polach lutowniczych pokrytych powłoką ochronną ENIG (złącza nie poddawano procesom starzenia)

Zaobserwowane niewielkie, cykliczne zmiany rezystancji spowodowane były zmianą temperatury wewnątrz komory i wynikały z temperaturowego współczynnika rezystancji łańcucha (głównie złączy lutowanych, w mniejszym stopniu elementów SMD oraz ścieżek przewodzących). Podczas testów łańcucha nie zarejestrowano zdarzeń.

8.5.4 Rezystancja złączy ulegających uszkodzeniu

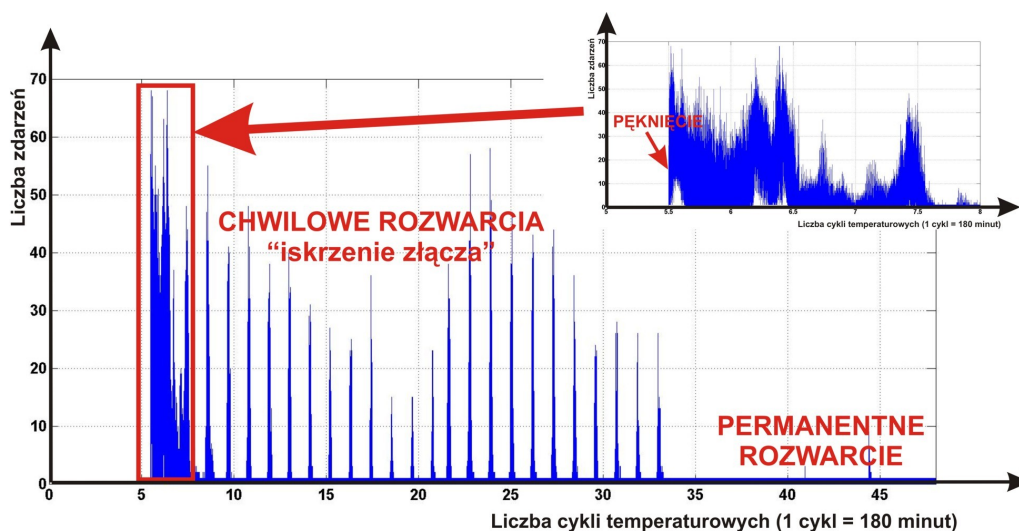
Na rysunku 8.40 pokazano wykres zmian rezystancji w funkcji liczby cykli

temperaturowych jednego z badanych łańcuchów złączy lutowanych, który uległ uszkodzeniu w czasie testu niezawodności. Jak widać, podczas szóstego cyklu temperaturowego co najmniej jedno ze złączy lutowanych łańcucha uległo pęknięciu powodując nagły wzrost rezystancji. Podczas testu niezawodności zmierzona wartość rezystancji łańcucha przekroczyła zarówno wartość progową, jak również górne ograniczenie wybranego zakresu pomiarowego równe 12 Ω .



Rysunek 8.40: Wykres zmian rezystancji łańcucha złączy lutowanych (SMD 1206) stopem SAC B na polach lutowniczych pokrytych powłoką ochronną ENIG (złączy nie poddawano procesom starzenia)

Pęknięte złącze lutowane poddawane wibracjom może być przyczyną chwilowych rozwarć obwodu elektrycznego. Na rysunku 8.41 pokazano wykres zmian liczby zdarzeń, rejestrowanych w stałych odstępach czasu (równych 200 ms), w funkcji liczby cykli temperaturowych. Wykres wykreślono na podstawie około 12 milionów obserwacji.



Rysunek 8.41: Liczba zdarzeń rejestrowanych w stałych odstępach czasu równych 200 ms

Analiza porównawcza wykresów (rysunek 8.40 oraz rysunek 8.41) wykazała, że pęknięte złącze lutowane może być przyczyną chwilowych zwarć i rozwarć obwodu elektrycznego (potocznie zwanych iskrzeniem). Całkowite rozwarcie obwodu elektrycznego nastąpiło dopiero podczas 33 cyklu temperaturowego (rysunek 8.41). Przypuszczalnie przyczyną cyklicznego występowania lokalnych maksimów i minimów liczby rejestrowanych zdarzeń (rysunek 8.41) były zmiany właściwości materiałów lub zmiany rozmiarów złączy i elementów SMD (rozszerzalność cieplna) podczas cykli temperaturowych. Prawdopodobnie szerokość szczeliny powstałej w złączu podczas procesu pęknięcia zmienia się wraz ze zmianą temperatury w komorze klimatycznej (szczelina powinna ulegać rozszerzeniu wraz ze spadkiem temperatury). Obwiednia maksimów lokalnych ma kształt zbliżony do sinusoidy, co może wskazywać na okresowy charakter procesu degradacji złączy lutowanych. Lokalne ekstrema oraz sinusoidalny kształt obwiedni maksimów liczby rejestrowanych zdarzeń zaobserwowano również podczas analiz części pozostałych uszkodzonych łańcuchów. Zauważone prawidłowości mogą wynikać z procesu degradacji złącza.

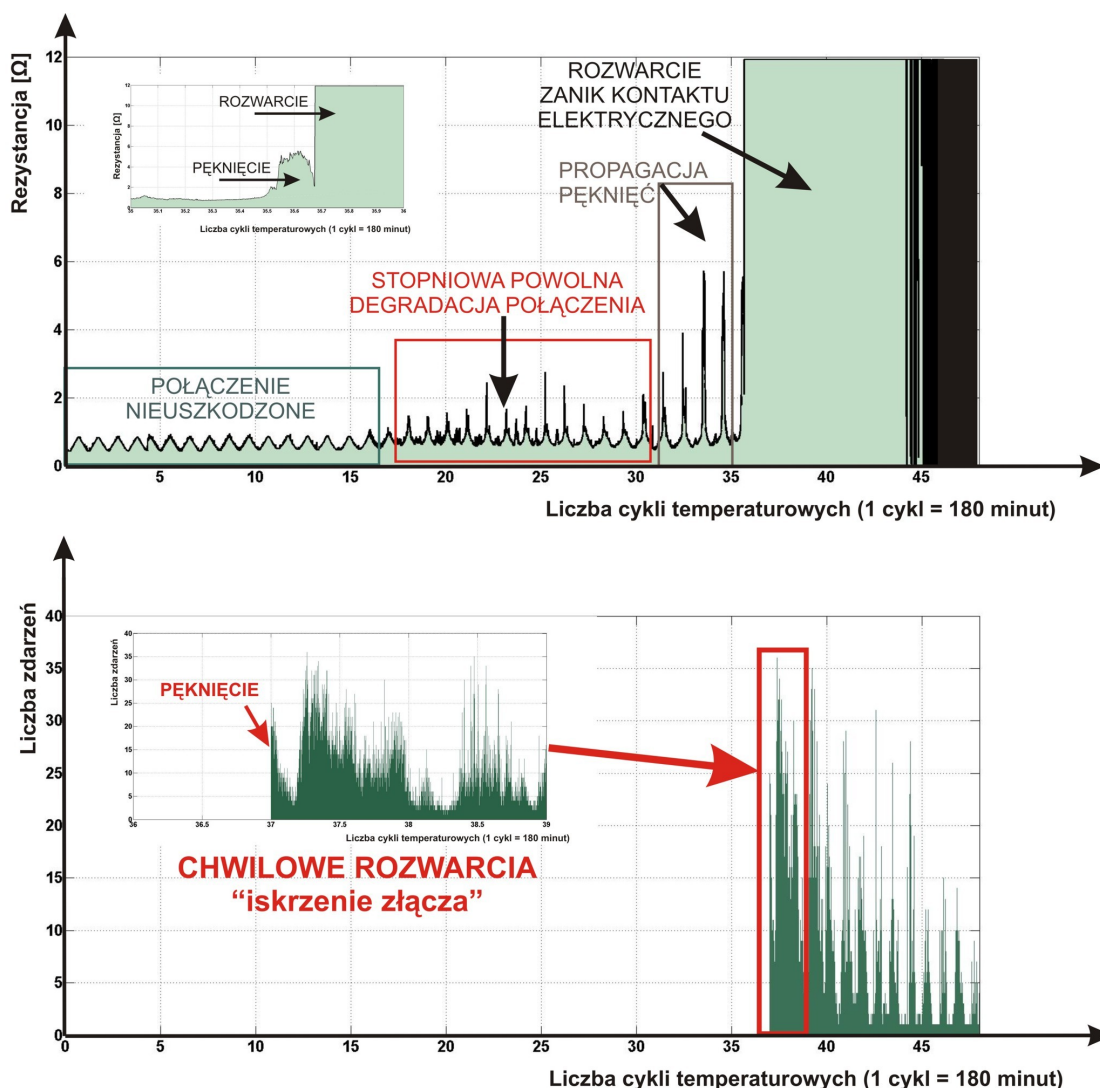
Oba badane łańcuchy złączy, przytoczone jako przykłady nieujawnionych i ujawnionych defektów (rysunek 8.39 oraz rysunek 8.40), testowano w tym samym czasie poddając takim samym narażeniom środowiskowym i mechanicznym.

8.5.5 Analiza procesu pęknięcia złączy na podstawie zarejestrowanych zmian ich rezystancji

Przeprowadzone badania wykazały, że opracowane stanowisko badawcze oraz prowadzone testy umożliwiają nie tylko dokładne określenie czasu wystąpienia uszkodzenia złączy lutowanych, ale również umożliwiają analizę procesu degradacji. Na rysunku 8.42 pokazano przykładową interpretację danych zebranych podczas procesu degradacji jednego z badanych łańcuchów złączy lutowanych SN100C na polach lutowniczych pokrytych powłoką ochronną ENIG.

Przez 16 początkowych cykli temperaturowych testu niezawodności nie zaobserwowano zmian rezystancji testowanego łańcucha mogących świadczyć o postępującej degradacji złączy lutowanych. Zaobserwowane nieznaczne zmiany rezystancji o charakterze okresowym spowodowane były zmianą temperatury w komorze klimatycznej, a wartość rezystancji lokalnych ekstremów utrzymywała się na stałym poziomie. Podczas kolejnych 15 cykli temperaturowych rezystancja łańcucha sukcesywnie rosła. Wartość rezystancji kolejnych lokalnych ekstremów ulegała powolnej zmianie. Powolne, stosunkowo niewielkie zmiany

rezystancji spowodowane były prawdopodobnie obecnością mikropęknięć. Podczas kolejnych 5 cykli temperaturowych rezystancja łańcucha mierzona w wysokich temperaturach gwałtownie wzrosła, prawdopodobnie doszło do propagacji pęknięć, które pod wpływem wibracji przyczyniły się do znacznego wzrostu rezystancji (1000% wartości początkowej rezystancji zmierzonej w temperaturze pokojowej). Ponieważ zmiany rezystancji nie przekroczyły wartości progowej charakteryzującej zdarzenie (1500%), zdarzenia nie zostały zarejestrowane. Podczas 36 cyklu wskutek pęknięcia złącza nastąpił gwałtowny wzrost rezystancji łańcucha i przekroczony został zakres pomiarowy.



Rysunek 8.42: Stopniowy proces degradacji łańcucha złącza lutowanych stopem SN100C na polach lutowniczych pokrytych powłoką ochronną ENIG (przed testem niezawodności złącza poddano procesowi starzenia w temperaturze 150°C przez 150 godzin)

Podczas każdego cyklu pomiarowego (200 ms) system diagnostyczno-pomiarowy rejestrował dziesiątki zdarzeń (chwilowe zwarcia i rozwarca). Liczba rejestrowanych zdarzeń malała z każdym kolejnym cyklem temperaturowym co może wskazywać na rozszerzanie się

powstałej szczeliny. Prawdopodobnie poddając złącza dalszym testom liczba zdarzeń spadłaby do zera (zanik „iskrzenia”) i wystąpiłoby całkowite, stałe rozwarcie obwodu elektrycznego. W celu precyzyjnego określenia momentu wystąpienia mikropęknięć należałoby obniżyć wartość progową rezystancji charakteryzującej zdarzenie (np. do 200% wartości początkowej rezystancji mierzonej w temperaturze pokojowej).

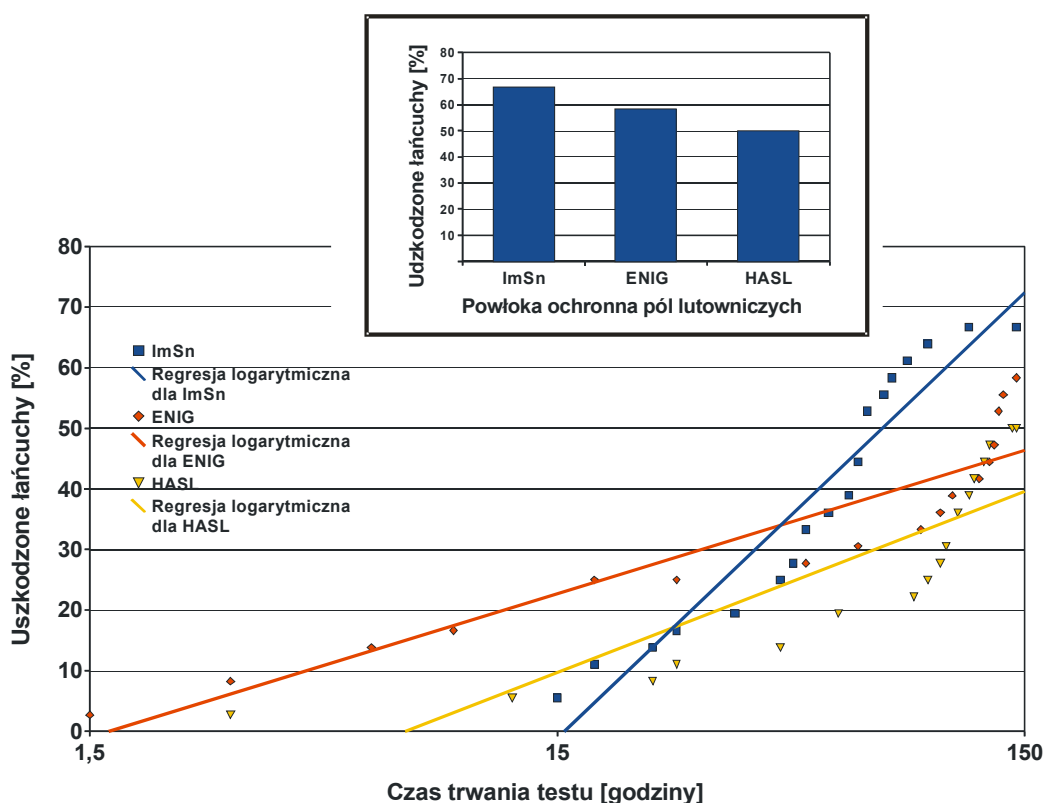
8.5.6 Wpływ składu powłoki ochronnej na uszkodzenia testowanych złączy lutowanych

W oparciu o zarejestrowane czasy do wystąpienia uszkodzeń łańcuchów poddawanych przyspieszonym testom niezawodności (tabela 8.1, 8.2 oraz 8.3) wykreślono wykresy uszkodzeń złączy w zależności od składu powłoki ochronnej, stopu lutowniczego oraz grubości i różnorodności faz międzymetalicznych (złącza poddawane procesom starzenia). Łańcuch złączy ulega uszkodzeniu jeżeli co najmniej jedno ze złączy lutowanych ulega pęknięciu.

Na rysunku 8.43 przedstawiono wykres zmian liczby uszkodzonych łańcuchów bezołowiowych złączy lutowanych na powłokach ochronnych ImSn, ENIG oraz HASL. Liczbę uszkodzonych łańcuchów wyrażono procentowo w odniesieniu do liczby testowanych łańcuchów (testowano po 36 łańcuchów złączy lutowanych na powłokach ochronnych ImSn, ENIG oraz HASL). Analizą objęto łącznie 108 łańcuchów złączy lutowanych bezołowiowymi stopami SAC A, SAC B oraz SN100C, testowanymi po montażu, po 300 oraz 600 godzinach starzenia.

Podczas pierwszych 15 godzin prowadzonych testów uszkodzeniom ulegały jedynie łańcuchy złączy lutowanych na powłokach ochronnych ENIG oraz HASL. Uszkodzenie pierwszego łańcucha złączy lutowanych na powłokach ImSn zaobserwowano dopiero po 15 godzinach testów. Nagły wzrost intensywności uszkodzeń złączy lutowanych na powłokach ENIG oraz HASL zaobserwowano po 90 godzinach testów, podczas gdy wzrost intensywności uszkodzeń złączy lutowanych na powłokach ImSn zaobserwowano po 40 godzinach testów. Nagły wzrost intensywności uszkodzeń może świadczyć o uszkodzeniach zmęczeniowych. W początkowej fazie testów najbardziej wytrzymałe na działanie cyklicznych narażeń środowiskowych oraz narażeń mechanicznych były złącza lutowane na polach pokrytych powłoką ochronną ImSn. Natomiast w dalszych fazach testu większą wytrzymałość zmęczeniową wykazały złącza lutowane na polach pokrytych powłokami ochronnymi HASL oraz ENIG.

Podczas testów uszkodzeniu uległo 67% łańcuchów złączy lutowanych na polach pokrytych powłoką ImSn, 58% łańcuchów złączy lutowanych na polach pokrytych powłoką ENIG oraz 50% łańcuchów złączy lutowanych na polach pokrytych powłoką HASL.



Rysunek 8.43: Łańcuchy złączy lutowanych na powłokach ImSn, ENIG oraz HASL (po 36 łańcuchów) uszkodzone podczas testów

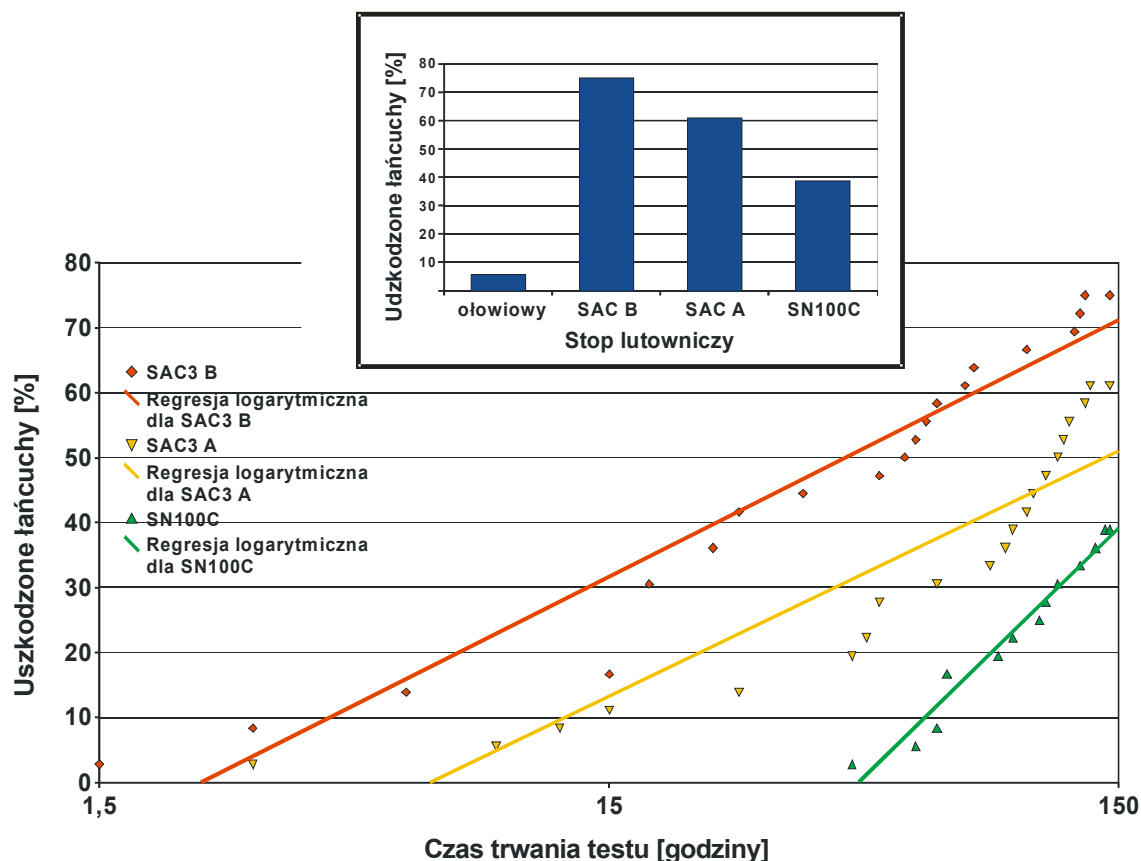
Przyczyną zaobserwowanych różnic wytrzymałości zmęczeniowej między złączami lutowanymi na różnych powłokach ochronnych może być:

- zróżnicowanie faz międzymetalicznych. Powłoki ochronne mają istotny wpływ na skład, grubość oraz ukształtowanie faz międzymetalicznych formujących się w złączach lutowanych,
- różnica zwilżalności pól lutowniczych przez ciekły lut podczas procesu lutowania. Spośród badanych powłok ochronnych pól lutowniczych powłoką najbardziej podatną na utlenienie, a tym samym pogorszenie zwilżalności oraz lutowności jest powłoka ImSn.

8.5.7 Wpływ stopu lutowniczego na uszkodzenia testowanych złączy lutowanych

Na rysunku 8.44 pokazano wykres zmian liczby uszkodzonych łańcuchów złączy

lutowanych bezołowiowymi stopami SAC A, SAC B oraz SN100C.



Rysunek 8.44: Łańcuchy złączy lutowanych bezołowiowymi stopami SAC A, SAC B, SN100C (po 36 łańcuchów) uszkodzone podczas testów

Analogicznie do poprzedniego wykresu liczbę uszkodzonych łańcuchów również wyrażono procentowo w odniesieniu do liczby testowanych łańcuchów (testowano po 36 łańcuchów złączy lutowanych stopami SAC A, SAC B oraz SN100C). Analizą objęto łącznie 108 łańcuchów złączy lutowanych na powłokach ImSn, ENIG oraz HASL, testowanymi po montażu, po 300 oraz 600 godzinach starzenia.

Podczas pierwszych 45 godzin testów uszkodzeniom ulegały jedynie łańcuchy lutowane stopami SAC A oraz SAC B. Uszkodzenie pierwszego łańcucha złączy lutowanych stopem SN100C zaobserwowano dopiero po 45 godzinach testów. Wzrost intensywności uszkodzeń złączy lutowanych stopem SAC B zaobserwowano po 35 godzinach testów, złączy lutowanych stopem SAC A po 80 godzinach testów, podczas gdy wzrost intensywności uszkodzeń złączy lutowanych stopem SN100C zaobserwowano po 90 godzinach testów. Najmniejszą wytrzymałość zmęczeniową wykazały złącza lutowane stopem SAC B, największą natomiast złącza lutowane stopem SN100C.

Podczas testów uszkodzeniu uległo 75% łańcuchów złączy lutowanych stopem SAC B, 61% łańcuchów złączy lutowanych stopem SAC A oraz 39% łańcuchów złączy lutowanych stopem SN100C. Spośród testowanych łańcuchów złączy lutowanych stopem ołowiowym jedynie dwa łańcuchy uległy uszkodzeniu (tabela 8.3). Po 6 oraz 30 godzinach testów uszkodzeniu uległy złącza lutowane na powłokach ENIG, poddane wcześniej starzeniu przez 600 godzin (co stanowi 6% łańcuchów złączy lutowanych stopem ołowiowym poddanych testom).

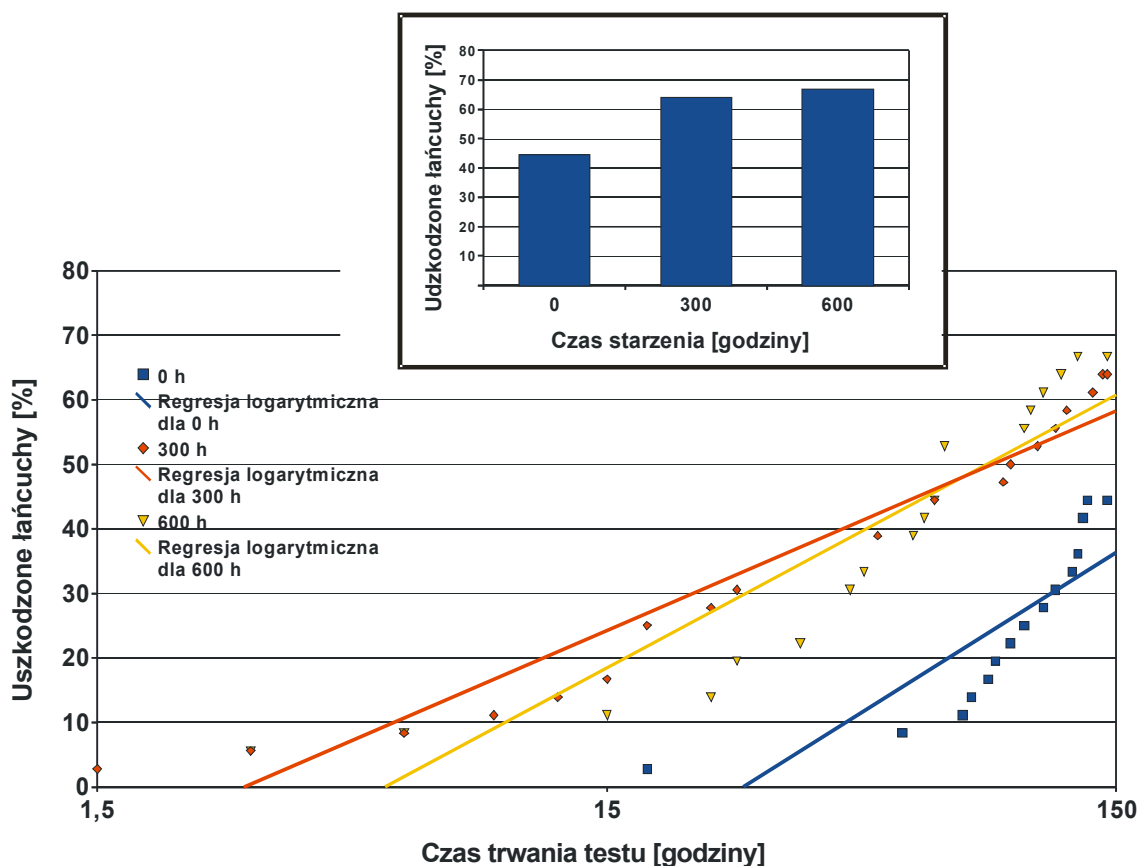
Analogicznie do analizy porównawczej złączy lutowanych na różnych powłokach przyczyną zaobserwowanych różnic wytrzymałości zmęczeniowej między złączami lutowanymi różnymi stopami bezołowiowymi może być zróżnicowanie faz międzymetalicznych oraz różnica zwilżalności pól lutowniczych.

8.5.8 Wpływ faz międzymetalicznych uformowanych podczas procesów starzenia na wytrzymałość zmęczeniową testowanych złączy lutowanych

Na rysunku 8.45 pokazano wykres zmian liczby uszkodzonych łańcuchów bezołowiowych złączy testowanych po montażu oraz złączy poddawanych procesom starzenia przez 300 oraz 600 godzin. Rezultatem poddawania złączy lutowanych procesom starzenia jest zwiększenie różnorodności oraz wzrost grubości warstw faz międzymetalicznych. Analogicznie do poprzednich wykresów liczbę uszkodzonych łańcuchów również wyrażono procentowo w odniesieniu do liczby testowanych łańcuchów (testowano po 36 łańcuchów złączy testowanych po montażu, po 300 oraz 600 godzinach starzenia). Analizą objęto łącznie 108 łańcuchów złączy lutowanych na stopami SAC A, SAC B oraz SN100C na powłokach ImSn, ENIG oraz HASL.

Uszkodzenia łańcuchów złączy poddawanych procesom starzenia obserwowano w stałych odstępach czasu od początku trwania testów. Uszkodzenie pierwszego łańcucha złączy testowanych po montażu zaobserwowano dopiero po 18 godzinach testów, przy czym intensywność uszkodzeń tych złączy wzrosła istotnie po 70 godzinach testu. Największą wytrzymałość zmęczeniową wykazały złącza testowane po procesie montażu.

Podczas testów uszkodzeniu uległo 67% łańcuchów złączy testowanych po starzeniu przez 600 godzin, 64% łańcuchów złączy testowanych po starzeniu przez 300 godzin oraz 44% łańcuchów złączy testowanych po procesie montażu.



Rysunek 8.45: Łańcuchy złączy lutowanych testowanych po montażu, po 300 oraz po 600 godzinach starzenia uszkodzone podczas testów

Mniejsza wytrzymałość zmęczeniowa złączy poddawanych starzeniu w stosunku do złączy testowanych po procesie montażu dowodzi, iż obecność zróżnicowanych pod względem składu oraz grubszych warstw faz międzymetalicznych istotnie zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową złączy.

8.5.9 Ocena wpływu badanych czynników oraz ich interakcji na wytrzymałość zmęczeniową testowanych złączy lutowanych

W celu określenia wpływu badanych czynników na czas poprawnej pracy złączy podczas prowadzonych testów niezawodności oraz interakcji między nimi przeprowadzono trzyczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Analizą objęto wyniki testów niezawodności 108 łańcuchów złączy lutowanych stopem SAC A, SAC B, SN100C na powłokach ImSn, ENIG, HASL, testowanych po procesie montażu, po 300 oraz po 600 godzinach starzenia.

Analizę ANOVA przeprowadzono na podstawie 108 obserwacji (po cztery obserwacje dla każdego zespołu czynników) czasu poprawnej pracy łańcuchów wyrażonego liczbą cykli temperaturowych.

Przyjęto następujące trzypoziomowe czynniki:

- stop lutowniczy (czynnik A): SAC B (A1), SAC A (A2), SN100C (A3),
- skład powłoki pola lutowniczego (czynnik B): ImSn (B1), ENIG (B2), HASL (B3),
- czas starzenia (czynnik C): 0 godzin (C1), 300 godzin (C2), 600 godzin (C3).

Wyniki analizy ANOVA zamieszczono w tabeli 8.4. Udział procentowy błędu w wariancji czasu poprawnej pracy jest istotny (przekracza znacznie umowną granicę poprawnego eksperymentu równą 15% [69]). Oznacza to, iż jakiś istotny czynnik mógł zostać pominięty w analizie, warunki prowadzenia eksperymentu nie były w pełni kontrolowane lub błąd pomiarowy był istotny. Testy niezawodności prowadzone były w ściśle kontrolowanych warunkach, a na podstawie pomiarów wykonanych przy użyciu systemu diagnostyczno-pomiarowego możliwe jest bardzo precyzyjne określenie czasu wystąpienia zdarzenia (uszkodzenia złącza). Podczas badań pominięto szczegółową ocenę zwilżalności pól lutowniczych oraz metalizacji elementów podczas procesu lutowania. Zwilżalność istotnie wpływa na wytrzymałość złączy lutowanych, co zostało dokładnie zbadane i udowodnione w licznych pracach naukowych i właśnie ten czynnik może wpływać na błąd eksperymentu.

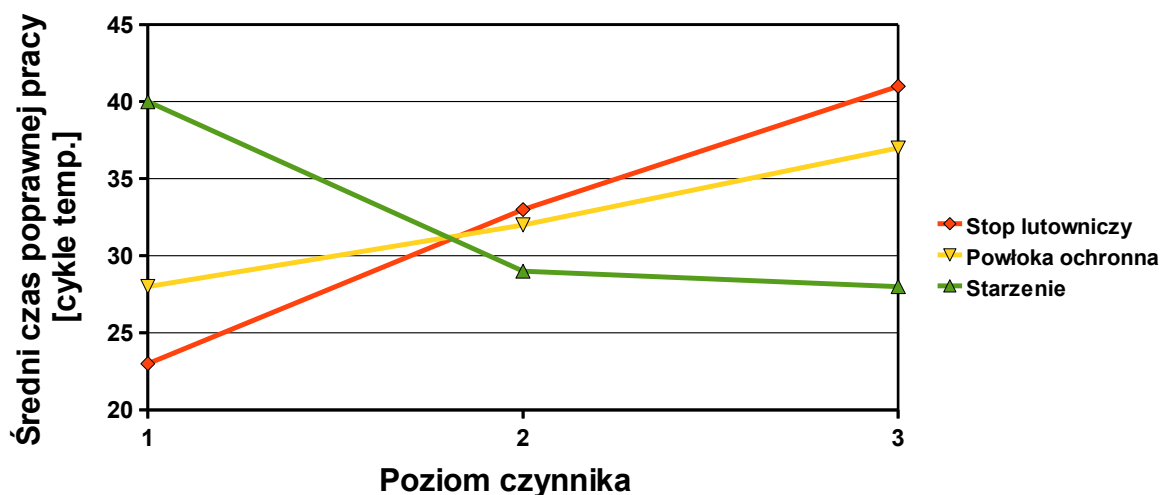
	SS Suma kwadratów	v Stopnie swobody	V wariancja	F Współczynnik	SS' Wartość oczekiwana	P Udział procentowy
A	6009	2	3005	25,03 ***	5769	19
B	1610	2	805	6,70 ***	1370	4
C	3305	2	1653	13,77 ***	3065	10
AxB	5136	4	1284	10,70 ***	4656	15
AxC	1703	4	426	3,55 ***	1223	4
BxC	948	4	237			
AxBxC	2670	8	334	2,78 ***	1709	5
e (błąd)	9723	81	120			
suma	31103	107			31102	100
e pooled	10670	85	357		13312	43

Tabela 8.4: Rezultaty trzyczynnikowej analizy wariancji czasu poprawnej pracy łańcuchów złączy podczas prowadzonych testów niezawodności (F-test: *** - 99% poziom ufności)

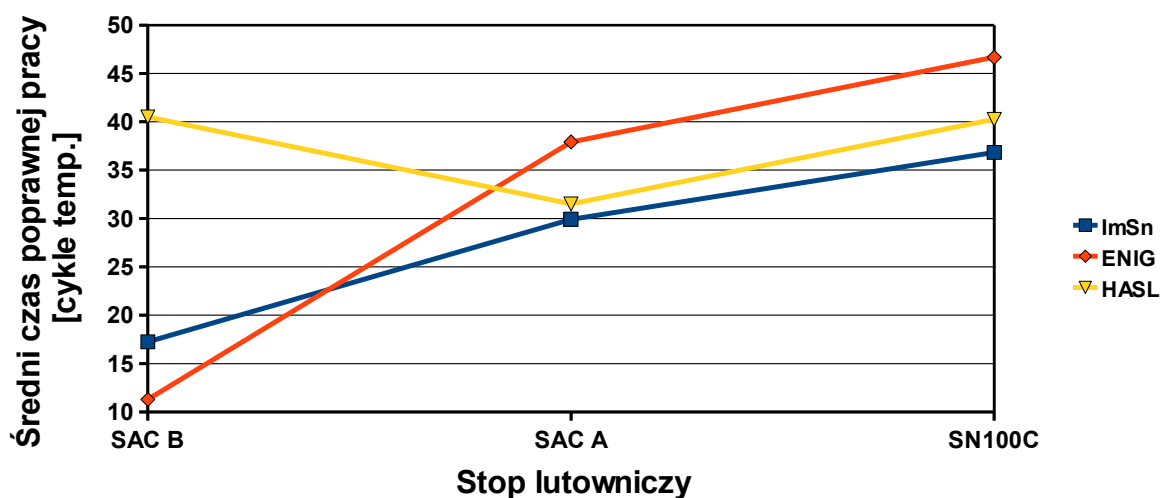
Spośród badanych czynników największy wpływ na czas poprawnej pracy podczas testu niezawodności ma czynnik A, czyli stop lutowniczy (19%), czynnik C, czyli czas starzenia (10%) oraz interakcja czynnika A oraz czynnika B, czyli stopu lutowniczego oraz powłoki pól lutowniczych (15%). Interakcja BxC jest nieistotna i jej suma kwadratów została dodana do

sumy kwadratów błędu (e_{pooled}).

Wykres efektów głównych badanych czynników pokazano na rysunku 8.46. Wykres interakcji czynnika A oraz czynnika B pokazano na rysunku 8.47.



Rysunek 8.46: Wykres efektów głównych czynnika A, B oraz C (wartość średnią czasu poprawnej pracy obliczono na podstawie 36 obserwacji)



Rysunek 8.47: Wykres interakcji A x B (stop lutowniczy x powłoka ochronna pól lutowniczych)

Uzyskane wyniki wskazują, iż różnorodność (czynnik A, interakcja AxB) oraz grubość (czynnik C) faz międzymetalicznych formujących się w złączach lutowanych mają istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową bezołowiowych złączy lutowanych. Najdłuższy czas do wystąpienia zdarzenia uzyskuje się dla pary: stop lutowniczy SN100C i powłoka pola lutowniczego ENIG. W przypadku stosowania stopu lutowniczego SAC B należy stosować powłoki pól lutowniczych HASL. Stosowanie powłok ImSn jest najmniej korzystne, co może

wskazywać na problem odmian alotropowych cyny. W warunkach normalnych cyna występuje w odmianie β (beta) 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 przechodzi w odmianę regularną α (alfa) 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. Podczas cyklu temperaturowego trwającego 180 minut, złącza lutowane poddawane są wibracjom w temperaturze poniżej 13°C przez 58 minut.

Zwiększoną intensywność uszkodzeń badanych złączy lutowanych zaobserwowano po kilkudziesięciu cyklach temperaturowych prowadzonych przyspieszonych testów niezawodności. Z doniesień literaturowych wynika, że złącza lutowane poddawane jedynie cyklem temperaturowym zazwyczaj ulegają uszkodzeniu po kilkuset lub kilku tysiącach cykli temperaturowych. Na podstawie wyników przeprowadzonych testów niezawodności oraz wyników testów publikowanych przez inne jednostki naukowe oszacowano, że wartość współczynnika AF przeprowadzonych przyspieszonych testów niezawodności jest co najmniej kilkadziesiąt razy wyższa niż wartość współczynnika AF testów niezawodności, podczas których złącza lutowane poddawane są jedynie cyklem temperaturowym.

8.5.10 Wnioski z przeprowadzonych testów niezawodności

Na podstawie przeprowadzonych testów niezawodności i analizy uzyskanych wyników można przedstawić następujące wnioski:

1. Pomiary rezystancji złączy po przeprowadzeniu testów nie gwarantują detekcji uszkodzenia złączy ponieważ pęknięte złącza niepoddawane wibracjom mogą przewodzić prąd elektryczny. Degradacja złączy wynikająca z cyklicznych narażeń jest procesem stopniowym. Po całkowitym pęknięciu złącze „przekształca” się z lutowanego w stykowe. Jedynie ciągle pomiary rezystancji podczas testów niezawodności umożliwiają detekcję momentu uszkodzenia oraz późniejszą analizę procesu degradacji złączy.
2. Przeprowadzona inspekcja mikroskopowa ujawniła, że przyczyną rozwarć obwodów elektrycznych (łańcuchów) były pęknięcia złączy lutowanych. Podczas inspekcji mikroskopowej uszkodzonych łańcuchów nie zaobserwowano uszkodzeń ścieżek przewodzących ani elementów SMD. Inspekcja mikroskopowa oraz pomiary elektryczne wykazały, iż większość pękniętych złączy była zlokalizowana na

- obrzeżach płytek testowych, w miejscach gdzie występują największe naprężenia
3. Wymiary geometryczne elementów SMD mają istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową złączy lutowanych. Złącza lutowane elementów SMD o wymiarach 3 mm x 1,5 mm (SMD 1206) znacznie częściej i szybciej ulegały uszkodzeniu niż złącza lutowane elementów o wymiarach 2 mm x 1,3 mm (SMD 0805).
 4. Możliwe jest dobranie konfiguracji materiałowych stop lutowniczy – powłoka ochronna dla zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej złączy. W badanych zestawach materiałowych największą wytrzymałość uzyskano dla konfiguracji stop SN100C na powłoce ImSn lub powłoce ENIG, jak również konfiguracji stop SAC A na powłoce HASL. Natomiast niezalecane konfiguracje to stop SAC B na powłoce ENIG lub ImSn. Zaobserwowane różnice między wytrzymałością złączy lutowanych stopem SAC A (stop Sn3Ag0,5Cu wyprodukowany przez firmę KOKI), a stopem SAC B (stop Sn3Ag0,5Cu wyprodukowany przez firmę COBAR) mogły być spowodowane różnicami zawartości wagowej cyny, srebra lub miedzi, odmiennymi topnikami lub obecnością w pastach dodatków, które nie zostały wyszczególnione przez producentów w ich specyfikacji technicznej. Przeprowadzone testy potwierdziły zapewnienia producenta, że złącza lutowane stopem SN100C, zawierającym dodatek niklu i śladowe ilości innych dodatków wpływających na mikrostrukturę złączy, cechuje wysoka niezawodność.
 5. Największy odsetek uszkodzonych łańcuchów zaobserwowano w przypadku złączy lutowanych na powłoce ImSn (67%). Łańcuchy zaczęły ulegać uszkodzeniu dopiero po 15 cyklach (45 godzinach testów). Jednak intensywność występowania uszkodzeń była większa niż w przypadku łańcuchów złączy lutowanych na pozostałych powłokach. Przyczyną mniejszej wytrzymałości zmęczeniowej złączy lutowanych na powłokach ImSn mogą być specyficzne właściwości cyny tworzącej odmiany alotropowe.
 6. Badania wykazały, że niezależnie od zastosowanej powłoki ochronnej złącza lutowane stopem ołowiowym cechowały się wyraźnie większą wytrzymałością zmęczeniową od złączy lutowanych stopami bezołowiowymi. Podczas testów uszkodzeniu uległo zaledwie 6% łańcuchów złączy lutowanych stopem ołowiowym i aż 75% stopem SAC B, 61% stopem SAC A oraz 39% stopem SN100C.
 7. Z analizy wariancji wynika, że największy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma

stop lutowniczy, interakcja stopu lutowniczego oraz powłoki ochronnej jak również proces starzenia. Skład zarówno stopu lutowniczego jak i powłoki ochronnej determinuje skład faz międzymetalicznych formujących się w złączu lutowanym. Analiza mikroskopowa, podczas której porównano struktury złączy bezpośrednio po montażu ze strukturami złączy poddawanych procesom starzenia wykazała, że w wyniku procesów starzenia zmienia się rodzaj, skład, ukształtowanie oraz grubość faz międzymetalicznych. Przeprowadzona analiza ilościowa oraz jakościowa badanych złączy pozwoliła wyszczególnić potencjalne konfiguracje o istotnie mniejszej wytrzymałości zmęczeniowej. Analizując np. złącza lutowane stopem SAC B stwierdzono, że w złączu formują się stosunkowo grube, jednorodne warstwy twardych, kruchych faz międzymetalicznych Cu_6Sn_5 oraz Cu_3Sn (na powłoce ImSn), $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ oraz roztworu stałego Ni_3P (na powłoce ENIG), które mogą znacznie zmniejszać wytrzymałość zmęczeniową złączy. Przewidywania zostały potwierdzone wynikami przeprowadzonych testów.

9 Wnioski końcowe

Bezpośrednim skutkiem wprowadzenia przepisów zakazujących stosowania w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym materiałów uznanych za szkodliwe i niebezpieczne było wymaganie wyeliminowania ołowiu ze składu stopów lutowniczych, co skutkuje koniecznością stosowania stopów bezołowiowych. Wyższa o kilkadziesiąt stopni temperatura topnienia tych stopów w porównaniu z bliskoeutektycznymi stopami SnPb wymusiła przystosowanie linii montażowych oraz podzespołów do prowadzenia procesu lutowania w wyższych temperaturach. W celu zapewnienia zwilżalności i lutowności przynajmniej takich jak w przypadku użycia stopów SnPb koniecznym było przystosowanie topników oraz powłok ochronnych do lutowania nowymi stopami lutowniczymi w wyższych temperaturach. Jednakże wprowadzenie nowych kompozycji materiałowych niesie ryzyko wystąpienia problemów niezawodnościowych, związanych z mniejszą wytrzymałością mechaniczną oraz zmęczeniową złączy lutowanych stopami bezołowiowymi.

Od kilkunastu lat w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania związane z niezawodnością złączy lutowanych stopami bezołowiowymi. Za główne czynniki zmniejszające wytrzymałość mechaniczną oraz zmęczeniową bezołowiowych stopów lutowniczych uważa się niedostateczną zwilżalność oraz obecność defektów struktury złącza

lutowanego. Z tego względu w chwili obecnej badania koncentrują się na problemach kinetyki wzrostu faz międzymetalicznych oraz przebiegu procesu zmęczenia złączy lutowanych poddawanych cyklicznym narażeniom środowiskowym i/lub mechanicznym. Badania prowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej wpasowały się w oba powyższe nurty badań uzupełniając obecny stan wiedzy, dotyczący czynników wpływających na skład i strukturę faz międzymetalicznych oraz wytrzymałości mechanicznej i zmęczeniowej bezołowiowych złączy lutowanych.

Badaniami eksperymentalnymi objęto złącza lutowane, wykonane w technologii lutowania rozplwowego. Proces prowadzono w profesjonalnej linii technologicznej zawierającej wielostrefowy piec lutowniczy, przy czym do pól lutowniczych testowych płytek obwodów drukowanych przylutowano zwory SMD o rozmiarach 1206 oraz 0805. Podczas produkcji testowych płytek obwodów drukowanych pola lutownicze pokryto jedną z trzech badanych powłok ochronnych (powłoką ImSn, ENIG lub HASL). Zastosowanie badanych powłok zależy od koplanarności ich powierzchni, podatności na utlenianie oraz kosztu ich naniesienia. Badaniami objęto złącza lutowane niskotemperaturowym stopem bezołowiowym zawierającym bizmut, dwoma trójskładnikowymi bezołowiowymi stopami lutowniczymi SnAgCu wyprodukowanymi przez różnych producentów i bezołowiowym stopem lutowniczym SN100C zawierającym mikrodotatki wpływające na strukturę złącza. Dodatkowo, w celach porównawczych zastosowano stop Sn36Pb2Ag. Wybór stopów lutowniczych w procesach lutowania zależy od ich kompatybilności z powłokami pól lutowniczych oraz wyprowadzeń (zwilżalność powierzchni podczas procesu lutowania), temperatury topnienia oraz ich kosztu.

Ze względu na specyfikę prowadzonych badań należało zapewnić wysoką powtarzalność jakości płytek testowych, co uzyskano wykorzystując profesjonalne linie produkcyjne przy zachowaniu procedur technologicznych, zgodnych z obowiązującymi normami. Płytki obwodów drukowanych, według własnego projektu, wyprodukowano w firmie Eldos. Proces montażu elementów na płytkach przeprowadzono w firmie Sonel. W celu przeprowadzenia kompleksowej analizy wpływu faz międzymetalicznych na wytrzymałość mechaniczną oraz zmęczeniową bezołowiowych złączy lutowanych złącza poddano procesom starzenia w wysokiej temperaturze, stymulując wzrost nowych oraz rozrost już uformowanych faz.

Badania mikroskopowe zglądów metalograficznych złączy lutowanych wykonane przy użyciu mikroskopu metalograficznego wykazały obecność makrodefektów w strukturze złączy np. pęcherzy, luk czy niejednorodnych warstw faz międzymetalicznych. Nie

zaobserwowano natomiast pęknięć ani braku zwilżenia lutowanych powierzchni. Defekty powstawały w złączach niezależnie od stopów lutowniczych oraz powłok ochronnych użytych do ich wykonania. Brak związku między obecnością defektów a składem stopu lutowniczego oraz powłoki ochronnej potwierdziły wyniki analizy wariancji ANOVA wskazujące, iż wpływ na obecność defektów miał czynnik technologiczny nieuwzględniony w badaniach. Obserwacje mikrostruktury złączy wykonane w elektronowym mikroskopie skaningowym wykazały w obszarze złączy obecność warstw faz międzymetalicznych, różniących się grubością oraz kształtowaniem. Wzór stechiometryczny określono na podstawie analizy ilościowej przeprowadzonej za pomocą spektrometru promieniowania rentgenowskiego EDS. Przeprowadzone analizy jakościowe oraz ilościowe badanych złączy wykazały zależność między składem stopów lutowniczych oraz powłok ochronnych a składem oraz grubością i kształtowaniem faz międzymetalicznych formujących się w obszarze złączy. Podczas badań szczególną uwagę zwrócono na obecność w niektórych złączach grubych, jednorodnych warstw kruchych faz międzymetalicznych oraz warstw roztworu stałego Ni_3P , które zgodnie z przyjętą tezą są przyczyną istotnego zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej oraz zmęczeniowej bezołowiowych złączy lutowanych. Analizy złączy poddawanych procesom starzenia wykazały wpływ długości procesu starzenia na zmiany kształtowania, grubości oraz składu warstw faz międzymetalicznych. Zaobserwowane zmiany spowodowane były procesami dyfuzji, które ulegają znacznemu przyspieszeniu w warunkach podwyższonej temperatury procesu starzenia. Na podstawie pomiarów grubości warstw faz międzymetalicznych obliczono współczynniki dyfuzji faz. Obliczone wartości współczynników dyfuzji nie odbiegają znacząco od wartości zamieszczanych w publikacjach wyników badań prowadzonych w innych jednostkach badawczych. Nie zaobserwowano wpływu procesów starzenia na makrostrukturę złączy.

Długoterminowa stabilność rezystancji złączy lutowanych stanowi istotne kryterium oceny ich jakości oraz niezawodności. Zmiana rezystancji złącza lutowanego jest oznaką zmian w strukturze złącza np. obecnością pęknięć, szczelin, rozrostu faz międzymetalicznych, obecnością luk Kirkendalla. W celu detekcji wpływu procesu starzenia złączy lutowanych na ich rezystancję opracowano system pomiarowy umożliwiający detekcję niewielkich zmian rezystancji (rzędu kilku procent) złączy lutowanych. Automatyzacja pomiarów oraz konstrukcja głowicy pomiarowej zapewniła wysoką powtarzalność warunków pomiaru (stały docisk ostrzy sond pomiarowych do powierzchni pól kontaktowych, precyzyjne pozycjonowanie głowicy pomiarowej). Badane złącza poddano procesom starzenia

odpowiadającym 25 latom przechowywania w temperaturze 25°C. Obiektem badań były złącza lutowane stanowiące połączenia elementów SMD z płytkami obwodów drukowanych. W celu uniknięcia błędnej interpretacji wyników pomiarów wykluczono wpływ procesów starzenia na rezystancję zwór SMD. Przeprowadzone badania wykazały, że procesy starzenia nie mają istotnego wpływu na rezystancję zwór SMD. Wyniki pomiarów rezystancji złączy poddano analizie wariancji ANOVA. Analiza ta wykazała, że istotny wpływ na wariancję rezystancji badanych złączy miał jedynie czas starzenia. Badane złącza należy uznać za stabilne pod względem rezystancji, a wzrost ich rezystancji na poziomie od kilku do kilkunastu procent nie powinien wpływać na funkcjonowanie podzespołów elektronicznych. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji mikrostruktury złączy można wywnioskować, że zaobserwowany wzrost rezystancji jest skutkiem rozrostu faz międzymetalicznych podczas procesów starzenia.

Badania wytrzymałości mechanicznej złączy lutowanych przeprowadzone w zrywarce przy stałym obciążeniu wykazały, że stopy lutownicze oraz długość procesu starzenia mają istotny wpływ na wytrzymałość mechaniczną złączy poddawanych działaniu sił ścinających. Zaobserwowane różnice wytrzymałości mechanicznej złączy lutowanych spowodowane były najprawdopodobniej różnicami grubości oraz składu faz międzymetalicznych.

W celu oceny wytrzymałości zmęczeniowej badanych złączy lutowanych przeprowadzono przyspieszone testy niezawodności. Podczas testów niezawodności płytki testowe poddawano wibracjom w warunkach cyklicznie zmiennej temperatury dokonując ciągłych pomiarów zmian rezystancji łańcuchów złączy. Czas wystąpienia zdarzeń polegających na wzroście rezystancji powyżej określonej wartości progowej, liczbę zdarzeń oraz wartość rezystancji badanych łańcuchów rejestrowano za pomocą opracowanego przy znacznym udziale autora systemu diagnostyczno-pomiarowego. Pomiar przyspieszenia płytki testowej poddawanej wibracjom wykazały, że temperatura panująca w komorze klimatycznej istotnie wpływa na jej częstotliwość rezonansową, a tym samym na jej odkształcenia. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wymiary geometryczne przylutowanych elementów mają istotny wpływ na czas do wystąpienia uszkodzeń złączy lutowanych. Proces degradacji złączy lutowanych większych elementów (SMD 1208) przebiegał znacznie szybciej niż złączy mniejszych elementów (SMD 0806). Wykazano, że pęknięte złącza lutowane mogą być przyczyną chwilowych rozwarć (i ponownych zwarć) obwodów elektrycznych. Na podstawie zarejestrowanych zmian rezystancji łańcuchów złączy możliwe było przeprowadzenie szczegółowej analizy procesu degradacji złączy lutowanych,

wyszczególnienie fazy powolnej degradacji, fazy propagacji pęknięć oraz momentu całkowitego zaniku kontaktu elektrycznego między polem lutowniczym a przylutowanym elementem. Analiza danych wykazała, że uszkodzenia złączy miały charakter powolnej degradacji struktury połączenia. Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe ujawniły, że przyczyną wzrostu rezystancji badanych łańcuchów były pęknięte złącza lutowane. Nie zaobserwowano natomiast uszkodzeń elementów oraz ścieżek przewodzących. Zebrane dane poddano analizie wariancji ANOVA w celu określenia istotności czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową złączy lutowanych. Wyniki analizy wykazały, że największy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową złączy lutowanych ma zróżnicowanie oraz grubość faz międzymetalicznych formujących się w złączach lutowanych, co dowodzi słuszności postawionej na wstępie tezy. Dobierając stopy lutownicze do powłok ochronnych pól lutowniczych można istotnie wpłynąć na zróżnicowanie faz międzymetalicznych, a tym samym na wytrzymałość zmęczeniową złączy lutowanych. Stwierdzono, że największą wytrzymałością zmęczeniową spośród bezołowiowych złączy lutowanych charakteryzowały się złącza lutowane stopem SN100C na powłokach ochronnych ImSn oraz ENIG, jak również złącza lutowane stopem SAC A na powłokach ochronnych HASL. Najmniejszą wytrzymałością zmęczeniową wykazały się złącza lutowane stopem SAC B na powłokach ENIG oraz ImSn. Badania te pokazały ponadto, że niezależnie od zastosowanej powłoki ochronnej oraz prowadzonych procesów starzenia, wytrzymałość zmęczeniowa złączy lutowanych stopem zawierającym ołów jest znacznie większa niż wytrzymałość zmęczeniowa złączy lutowanych stopami bezołowiowymi.

Bibliografia

1. R. R. Tummala, *Fundamentals of Microsystems Packaging*, McGraw-Hil, 2001
2. S. Ganesan, M. Pecht., *Lead-free Electronics*, John Wiley & Sons Inc., 2006
3. S. Ganesan, M. Pecht, *Lead-free Electronics*, 2004 Edition, CALCE EPSC Press, 2003
4. E. Bradley, C.A. Handwerker, J. Bath, R.D. Parker, R.W. Gedney, *Lead-free Electronics: INEMI Projects Lead to Successful Manufacturing*, John Wiley & Sons Inc., 2007
5. K. Bukat, H. Hackiewicz, *Lutowanie bezołowiowe*, BTC, 2007
6. R. Kisiel, *Połączenia lutowane w montażu elektronicznym z zastosowaniem materiałów ekologicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009
7. J. Sitek, *Badania wpływu zwilżalności materiałów bezołowiowych na właściwości połączeń lutowanych uzyskanych w procesie bezołowiowego montażu powierzchniowego*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2008
8. Dyrektywa 2002/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady (RoHS), *Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*, Dz. Urz. UE L 37 z 13.02.2003 r., 2003
9. Dyrektywa 2002/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady (WEEE), *Waste Elctrical and Electronic Equipment*, Dz. Urz. WE L 37 z 13.02.2003, 2003
10. P. Matkowski, J. Felba, K. Friedel, *Organizacja systemu gospodarowania zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym w Polsce*, Nowe wyzwania - nowe rozwiązania: Polski Kongres Logistyczny - LOGISTICS 2008: materiały konferencyjne, str. 109-123, 2008
11. P. Matkowski, K. Friedel, *Management of waste electrical and electronic equipment in Poland - ecological, organizing and economical aspects*, *Proceedings of 2008 International Students and Young Scientists Workshop "Photonics and Microsystems": international optoelectronics workshop*, Wrocław-Szklarska Poręba, str. 50-52, 2008
12. P. Matkowski, K. Friedel, J. Felba, *System of waste electrical and electronic equipment management potential directions of development in a-few year perspective*, *Progress in eco-electronics / eds Krystyna Bukat, Józef Gromek, Marek Gonera*. Warsaw: Tele & Radio Research Institute, 2008
13. P. Matkowski, K. Friedel, J. Felba, *Treatment of waste electrical and electronic equipment: technologies of disassembly, recycling stages*, *Progress in eco-electronics / eds Krystyna Bukat, Józef Gromek, Marek Gonera*. Warsaw: Tele & Radio Research Institute, 2008
14. Ministerstwo Gospodarki i Pracy, *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 6 października 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących ograniczenia wykorzystywania w sprzęcie elektronicznym i elektrycznym niektórych substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko*, Dz.U. Nr 229, poz. 2310, 2004
15. Ministerstwo Gospodarki, *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 1 kwietnia 2009 zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących ograniczenia wykorzystywania w sprzęcie elektronicznym i elektrycznym niektórych substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko*, Dz.U. Nr 63, poz. 525, 2009
16. Ministerstwo Gospodarki, *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 marca 2007 zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących ograniczenia wykorzystywania w sprzęcie*

- elektronicznym i elektrycznym niektórych substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko, nr Dz.U. Nr 69, poz. 427, 2007
17. P. Matkowski, Groźne elektroodpady, Forum Samorządowe, nr 10, str. 16, 2008
 18. K. Friedel, Krytyczny przegląd bezołowiowych stopów lutowniczych, Ekologia w elektronice, III Krajowa konferencja naukowo-techniczna, materiały konferencyjne, Warszawa, 30.09-1.10.2004, str. 40-48, 2004
 19. Environmental Protection Agency, www.epa.gov
 20. METI Ministry of Economy, Trade and Industry, www.meti.go.jp
 21. K. Friedel, P. Matkowski, J. Felba, Uproszczona ocena cyklu życia złączy wykonanych przy zastosowaniu bezołowiowych stopów lutowniczych oraz klejów elektrycznie przewodzących, Prace Przemysłowego Instytutu Elektroniki, nr 153, seria 47, str. 84-94, 2006
 22. Soldertec Global, www.lead-free.org
 23. Japan Electronics and Information Technology Industries, www.jeita.or.jp
 24. IPC, Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments, nr IPC-SM-785, 1992
 25. K. Friedel, Technologia lutowania spoiwami bezołowiowymi, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, nr 9, seria 46, str. 32-34, 2005
 26. A. Wymysłowski, Numeryczne metody projektowania termomechanicznego w montażu elektronicznym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007
 27. K. Friedel, Montaż w elektronice - wykład
 28. M. Szwech, Z. Drozd, Life-Time of Lead-free Soldered SMT Joints, Reliability physics: analysis and life time-prediction in electronics, str. 17-21, 2008
 29. Z. Drozd, M. Szwech, R. Kiesiel, Thermal and Mechanical Reliability Tests of Lead free soldered SMT Joints, 30th ISSE 2007, str. 177-182, 2007
 30. R. Wrona, Z. Drozd, Resistance of BGA Contacts During Reliability Tests, 30th ISSE 2007, str. 162-166, 2007
 31. K. Zeng, K.N. Tu, Six cases of reliability study of Pb-free solder joints In electronic packaging technology, Materials Science and Engineering, nr 38, str. 55-105, 2002
 32. X. Li, B. Wu, X. Yang, The Formation and Evolution of IMC and its Effect on the Solder Joint Properties, 2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, str. 1-9, 2005
 33. M. Li, Y. Lee, D. Olsen, W. Chen, B. Chong, S. Mhaisalkar, Microstructure Joint Strength and Failure Mechanisms of SnPb and Pb-Free Solders in BGA Packages, IEEE Transactions on Electronics Packaging, nr 3, seria 25, str. 185-192, 2002
 34. A. Syed, Reliability of Lead-Free Solder Connections for Area-Array Packages, IPC SMEMA Council APEXSM 2001, str. 1-9, 2001
 35. Ch. Yang, Y. Chan, W. Lee, Y. Ye, S. Liu, Comparison of Thermal Fatigue Reliability of SnPb and SAC Solders under Various Stress Range Conditions, 2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP), str. 1119-1123, 2009
 36. B. Vandeveld, M. Gonzales, P. Limaye, P. Ratchev, E. Beyne, Thermal cycling reliability of SnAgCu and SnPb solder joints: A comparison for several IC-packages, Microelectronics Reliability, nr 47, seria , str. 259-265, 2007

37. A. Schubert, R. Dudek, W. Walter, E. Jung, A. Gollhardt, B. Michel, H. Reichl, Reliability Assessment of Flip-Chip Assemblies with Lead-free solder Joints, 2002 Electronic Components and Technology Conference, str. 1246-1255, 2002
38. A. Schubert, R. Dudek, E. Auerswald, A. Gollhardt, H. Reichl, Fatigue Life Models for SnAgCu and SnPb Solder Joints Evaluated by Experiments and Simulation, 2003 Electronic Components and Technology Conference, str. 603-610, 2003
39. A. Fix, W. Nuechter, J. Wilde, Microstructural changes of lead-free solder joints during long-term ageing, thermal cycling and vibration fatigue, Soldering & Surface Mount Technology, str. 13-21, 2008
40. National Institute of Standards and Technology, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-Free Solders, 2002
41. L.A. Dobrzański, Metaloznawstwo i obróbka cieplna, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1997
42. W. Peng, E. Monlevade, M. Marques, Effect of thermal aging on the interfacial structure of SnAgCu solder joint on Cu, Microelectronics Reliability, nr 47, str. 2161-2168, 2007
43. C.-T. Peng, C.-T. Kuo, K.-N. Chiang, T. Ku, K. Chan, Experimental characterization and mechanical behavior analysis of intermetallic compounds of Sn-3.5Ag lead-free solder bump with Ti/Cu/Ni UBM on copper chip, Microelectronics Reliability, nr 46, str. 523-534, 2006
44. M. He, Z. Chen, G. Qi, Solid state interfacial reaction of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag solders with Ni-P under bump metallization, Acta Materialia, nr 52, str. 2047-2056, 2004
45. C.M.L Wu, D.Q. Yu, C.M.T. Law, L. Wang, Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions, Materials Science and Engineering, nr 44, str. 1-44, 2004
46. S.L. Ngoh, W. Zhou, H.L. Pang, X.Q. Shi, Growth of intermetallic compounds during isothermal annealing of a Sn-Ag-Cu lead-free solder, Soldering & Surface Mount Technology, str. 1-9, 2004
47. Z. Mei, M. Kaufmann, A. Elsambolchi, P. Johnson, Brittle interfacial fracture of PBGA packages soldered on electroless nickel/immersion gold, Proceedings of the 48th Electronic Components and Technology Conference, str. 952-961, 1998
48. Z. Mei, M. Ahmad, M. Hu, G. Ramakrishna, Kirkendall Voids at Cu/Solder Interface and Their Effects on Solder Joint Reliability, 2005 Electronic Components and Technology Conference, str. 952-961, 2005
49. S. Dunford, S. Canumalla, P. Viswanadham, Intermetallic Morphology and Damage Evolution Under Thermomechanical Fatigue of Lead (Pb)-Free Solder Interconnections, 2004 Electronic Components and Technology Conference, str. 726-736, 2004
50. M. Li, F. Zhang, W.T. Chen, K. Zeng, K.N. Tu, H. Balkan, P. Elenius, Interfacial microstructure evolution between eutectic SnAgCu solder and Al/Ni(V)/Cu thin films, Materials Research Society, nr 17, str. 1612-1621, 2002
51. B.L. Chen, G.Y. Li, Influence of Sb on IMC growth in Sn-Ag-Cu Pb-free solder joints in reflow process, Thin Solid Films, nr 462, str. 395-401, 2004
52. D. Q. Yu, L. Wang, C.M.L. Wu, C.M.T. Law, The formation of nano-Ag₃Sn particles on the intermetallic compounds during wetting reaction, Journal of Alloys and Compounds, nr 389, str. 153-158, 2005
53. G.J. Jackson, H. Lu, R. Durairaj, N. Hoo, Ch. Bailey, N.N. Ekere, J. Wright, Intermetallic phase detection in lead-free solder using synchrotron X-ray diffraction, Journal of Electronics Materials, nr 33, str. 1524-1529, 2004

54. H. Tsuritani, T. Takayanagi, T. Sayama, Application of X-ray microtomography to evaluate thermal fatigue crack propagation and lifetime in flip chip interconnects, Spring Research Frontiers, nr 8, str. 156-157, 2007
55. Y. Wang, F. Duewer, S. Kamath, D. Scott, W. Yun, A novel X-ray microtomography system with high resolution and throughput, Technical Proceedings of the 2004 NSTI- Nanotechnology Conference and Trade Show, str. 503-507, 2004
56. Royal Ohm Co. Ltd., www.royalohm.com
57. Sonel SA., www.sonel.pl
58. NINIJI, ninigi.com
59. ISOLA, www.isola-group.com
60. ELDOS, www.eldos.com.pl
61. IPC, Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards, Includes Amendment 1, nr IPC 6012B, 2004
62. IPC, Acceptability of Printed Boards, nr IPC A-600G, 2004
63. AMTECH, www.amtechsolder.com
64. COBAR, www.cobar.com
65. KOKI, www.ko-ki.co.jp
66. J. Haimovich, Cu-Sn Intermetallic Compound Growth in Hot-Air-Leveled Tin at and below 100 °C, AMP Journal of Technology, nr 3, str. 46-54, 1993
67. M. N. Harif, I. Ahmad, A. Zaharim, The Effect of High Temperature Storage on Lead-free Solder Joint Material Strength Using Pull Test Method, ICSE2006 Proc. 2006, Kuala Lumpur, Malaysia, str. 685-689
68. P. Matkowski, Ł. Małecki, B. Bober, J. Felba, Resistance changes of lead-free solder joints induced by defects of their structure, 33 International Conference of IMAPS - CPMT IEEE Poland [Dokument elektroniczny], Pszczyna, Poland, 21-24 September, 2009: proceedings, str. 251-254, 2009
69. P. J. Ross, Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1988
70. IPC, Dopuszczalność Zespołów Elektronicznych, nr IPC-610 D, 2005
71. W. Engelmaier, Voids in solder joints - reliability, Global SMT & Packaging Magazine, nr 6, str. 44-45, 2006
72. R. Aspandiar, Voids in Solder Joints, SMTA Northwest Chapter Meeting, 2005
73. J. Hwang, Environment-Friendly Electronics: Lead-Free Technology, Electrochemical Publications LTD., 2001
74. Sh. Dongkai, Voids in Solder Joints, Global SMT & Packaging, 2006
75. Molatta G., Powłoki metalowe. Powłoki autokatalityczne (bezprądowe) ze stopu nikiel-fosfor. Wymagania techniczne i metody badań, nr PN-EN ISO 4527, 2004
76. ISO, Autokatalityczne powłoki nikiel-fosfor - Wymagania i metody badań, nr ISO 4527:1987
77. Galwanizowanie, galwanizowanie.pl
78. J. W. Jang, P. G. Kim, K. N. Tu, D. R. Frear, R. Thompson, Solder reaction-assisted crystallization of electroless Ni-P under bump metallization in low cost flip chip technology, Journal of Applied Physics, nr 12, seria 85, str. 8456-8463, 1999
79. K.C. Hung, Y.C. Chan, C.W. Tang, H.C. Ong, Correlation between Ni₃Sn₄ Intermetallics and Ni₃P due to Solder Reaction-assisted Crystallization of Electroless Ni-P Metallization in Advanced Packages, Journal of Materials Research, nr 11, seria 15, str. 2534-2539, 2000

80. G. Milad, J. Martin, www.circuitree.com
81. K. Zeng, R. Stierman, D. Abott, M. Martuza, The root cause of black pad failure of solder joints with electroless Ni/Immersion gold plating, JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, nr 6, seria 58, str. 75-79, 2006
82. B. Kim, S. Lee, J. Kim, K. Ji, Y. Yoon, M. Kim, S. Park, J. Yoo, Origin of Surface Defects in PCB Final Finishes by the Electroless Nickel Immersion Gold Process, Journal of Electronic Materials, nr 4, seria 37, str. 527-534, 2008
83. www.pcb007.com
84. P. Matkowski, R. Zawierta, K. Urbański, J. Felba, Stability of solder joint resistance after multiple aging processes: repeatable multiple measurements of solder joint resistance, 33 International Conference of IMAPS - CPMT IEEE Poland [Dokument elektroniczny], Psczynna, Poland, 21-24 September, 2009: proceedings / [eds Piotr Kowalik, Krzysztof Waczyński]. Kraków: International Microelectronics and Packaging Society - Poland Chapter, str. 255-260, 2009
85. FLUKE, www.fluke.com
86. ASTROSYN, www.astrosyn.com
87. MIL-STD, www.ingun.de
88. A. S. Tanenbaum, Sieci Komputerowe, Helion, 2004
89. P. Matkowski, P. Obajtek, B. Bober, J. Felba, Influence of soldering and aging processes on the structure of lead-free solder joints, 33 International Conference of IMAPS - CPMT IEEE Poland [Dokument elektroniczny], Psczynna, Poland, 21-24 September, 2009 : proceedings, str. 247-250, 2009
90. J. Ekner, M. Mika, Mikroelektroniczne konstrukcje modułowe, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1977
91. MIL-STD, Stabilization Bake, nr Mil-Std-883 Method 1008
92. MIL-STD, Thermal Shock Test, nr Mil-Std-883 Method 1011
93. JEDEC, Thermal Schock, nr JESD22-A106B, 2004
94. MIL-STD, Temperature Cycling Test, nr Mil-Std-883 Method 1010
95. JEDEC, Solid State Devices, Testing Quality and Reliability - Test Method A104: Temperature Cycling, nr JEDEC JESD22-A104, 2000
96. MIL-STD, Vibration Test, nr Mil-Std-933 Method 2005
97. MIL-STD, Vibration Test, nr Mil-Std-933 Method 2007
98. MIL-STD, Mechanical Shock Test, nr Mil-Std-883 Method 2002
99. M/RAD Corporation, www.mradcorp.com
100. P. Matkowski, H. Qi, Vibration tests utilization in the study of reliability of connections in microelectronics, Photonics and microsystems. Proceedings of 2005 International Students and Young Scientists Workshop. International Optoelectronics Workshop, Dresden, str. 61-64, 2005
101. MIL-STD, Steady-State Life Test, nr Mil-Std-833 Method 1005
102. JEDEC, Temperature, Bias and Operating Life, nr JEDEC JESD22-A108
103. S.S. Manson, Thermal Stress and Low Cycle Fatigue, New York: McGraw-Hill, 1966
104. K.C. Norris, A.H. Landzberg, Reliability of Controlled Collapse Interconnections, Interconnection Reliability IBM J. Res. Dev., str. 266-271, 1969
105. IPC, Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments,

nr IPC-9701A, 2002

106. J-P. Clech, Acceleration Factors and Thermal Cycling Test Efficiency for Lead-free Sn-Ag-Cu Assemblies, SMTAI 2005

107. F.X. Che, J.H.L. Pang, B.S. Xiong, L. Xu, T.H. Low, Lead Free Solder Joint Reliability Characterization for PBGA, PQFP and TSSOP Assemblies, 2005 Electronic Components and Technology Conference, str. 916-921, 2005

108. A. Guedeon, Contribution a l'exploitation d'un Systeme de Caracterisation Thermomecaniqu Pour la Conception Optimisee d'assemblage Sans Plomb, ENSEIRB, IXL Lab, Univ. Bordeaux, 2005

109. H.S Ng, T.Y. Tee, K.Y. Goh, J. Luan, T. Reinikainen, E. Husa, A. Kujala, Absolute and Relative Fatigue Life Prediction Methodology for Virtual Qualification and Design Enhancement of Lead-free BGA, 2005 Electronic Components and Technology Conference, str. 1282-1291, 2005

110. A. Schubert, R. Dudek, E. Auerswald, A. Gollhardt, B. Michel, H. Reichl, Fatigue Life Models for SnAgCu and SnPb Solder Joints Evaluated by Experiments and Simulation, 2003 Electronic Components and Technology Conference, str. 603-610, 2003

111. A. Syed, Accumulated Creep Strain and Energy Density Based Thermal Fatigue Life Prediction Models for SnAgCu Solder Joints, 2004 Electronic Components and Technology Conference, str. 737-746, 2004

112. Q. Zhang, A. Dasgupta, P. Haswell, Viscoplastic Conductive Properties and Energy-Partitioning Model of Lead-Free Sn3.9Ag0.6Cu Solder Alloy, 2003 Electronics Components and Technology Conference, str. 1862-1868, 2003

113. N. Pan, An Acceleration Model for Sn-Ag-Cu Solder Joint Reliability under Various Thermal Cycle Conditions, SMTAI 2006, str. 876-883, 2006

114. O. Salmela, Acceleration Factors for Lead-Free Solder Materials, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, nr 4, seria 30, str. 700-707, 2007

115. O. Salmela, T. Nieminen, J. Särkkä, M. Tammenmaa, Reliability Analysis of Lead-Free Solder Castellations, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, nr 1, seria 31, str. 13-22, 2008

116. W. Engelmaier, The Use Environments of Electronic Assemblies and Their Impact on Surface Mount Solder Attachment Reliability, IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, nr 4, seria 13, str. 903-908, 1990

117. P. Lall, N. Singh, M. Strickland, J. Blanche, J. Suhling, Decision-Support Models for Thermo-Mechanical Reliability of Lead-free Flip-Chip Electronics in Extreme Environments, 2005 Electronic Components and Technology Conference, str. 127-136, 2005

118. R. Dudek, R. Ratchev, W. Faust, B. Michel, Thermal fatigue investigations on different Sn-based solders subjected to test and service environments, Proceedings ITherm 2008, Orlando, USA, May 28-31, str. 668 – 675, 2008

119. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, www.izm.fraunhofer.de

120. R. Dudek, W. Faust, R. Ratchev, M. Roellig, H-J. Albrecht, B. Michel, Thermal Test and Field Cycling Induced Degradation and its FE-Based Prediction for Different SAC Solders, Proceedings ITherm 2008, Orlando, USA, May 28-31, str. 668-675, 2008

121. F. Barez, Semiconductor Packaging A Multidisciplinary Approach: Vibration and Shock Analysis, John Wiley & Sons, INC., 1994

122. S. Mathew, D. Das, M. Osterman, M. Pecht, Prognostics Assessment of Aluminium Support Structure on Printed Circuit Board, ASME Journal of Electronic Packaging EP-05-1031, nr 4, seria 128, str. 1-16, 2006
123. D. S. Steinberg, Vibration Analysis for Electronic Equipment: Designing Electronics for Random Vibration, John Wiley & Sons, INC., 2000
124. H. Qi, S. Ganesan, J. Wu, M. Pecht, P. Matkowski, J. Felba, Effects of printed circuit board materials on lead-free interconnect durability, 5th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics Polytronic 2005, proceedings, str. 140-144, 2005
125. The Center for Advanced Life Cycle Engineering (CALCE), www.calce.umd.edu
126. Freescale, www.freescale.com
127. Angeloantoni, www.angelantoni.it
128. LDS Group, www.lds-group.com
129. P. Matkowski, R. Zawierta, J. Felba, Vibration response of printed circuit board in wide range of temperature: characterization of PCB materials, 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2009, Brno, Czech Republic, 2009
130. IMEC, www.imec.be/ScientificReport/SR2007/html/1384159.html
131. macintoshhowto.com/hardware/how-do-i-get-my-broken-g4-ibook-fixed.html
132. D.R. Frear, J.W. Jang, J.K. Lin, C. Zhang, Pb-Free Solders for Flip-Chip Interconnections, JOM Journal of the Minerals, nr 6, seria 53, str. 28-32, 2001
133. P. Matkowski, K. Urbański, T. Fałat, J. Felba, Z. Żaluk, R. Zawierta, A. Dasgupta, M. Pecht, Application of FPGA units in combined temperature cycle and vibration reliability tests of lead-free interconnections, 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference, [ESTC] 2008: proceedings, Greenwich, UK, str. 1375-1379, 2008
134. T. Fałat, J. Felba, P. Matkowski, K. Urbański, Z. Żaluk, Combined system for testing of joints in microelectronic packaging under thermal cycling, humidity and vibration loading, XXIX International Conference of International Microelectronics and Packaging Society Poland Chapter. Proceedings, Koszalin-Darłówek, 18-21 September 2005, str. 235-238, 2005
135. K. Urbański, P. Matkowski, R. Zawierta, A fast recorder for changes of a resistance during joint failure in electronics, Proceedings of 2008 International Students and Young Scientists Workshop "Photonics and Microsystems": international optoelectronics workshop, Wrocław-Szklarska Poreba, 20-22 June, 2008, str. 87-89, 2008
136. XILINX, www.xilinx.com
137. A. Opara, Dekompozycyjne metody syntezy układów kombinacyjnych wykorzystujące binarne diagramy decyzyjne, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2008
138. R. Zawierta, P. Matkowski, K. Urbański, J. Felba, Data visualization in a fast data acquisition system for long-term reliability tests of microelectronic interconnections, 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference [ESTC] 2008: proceedings, Greenwich, UK, str. 481-484, 2008