

prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki  
Wydział Inżynierii Produkcji  
Instytut Techniki Wytwarzania  
Politechnika Warszawska  
Al. Niepodległości 222

Warszawa, 17 czerwca 2010

**OCENA PRACY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. MARKA ŻUBROWSKIEGO  
nt. „WPLYW WARUNKÓW TECHNOLOGICZNYCH MIKROSPAJANIA NA  
STRUKTURĘ I WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE POŁĄCZEŃ,**

**Charakterystyka ogólna pracy**

Ocenę niniejszą wykonałem na podstawie pisma Prodziekana Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej ds. Ogólnych i Nauki prof. zw. dr hab. inż. Jacka Senkary z dnia 15 kwietnia 2010 roku zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej w dniu 30 marca 2010 roku.

Możliwość optymalnego wykorzystania właściwości materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych, uwarunkowana jest często umiejętnością spajania ich w taki sposób, aby połączenie spełniało wymagania dotyczące parametrów geometrycznych, wytrzymałości, kompensacji naprężeń wywołanych różną ciągliwością i wielkością współczynników rozszerzalności cieplnej łączonych elementów, odporności korozyjnej oraz właściwości elektrycznych. Spełnienie tych wymagań jest szczególnie trudne w przypadku układów o małych wymiarach, np. w urządzeniach elektronicznych.

Dążenie do miniaturyzacji urządzeń elektronicznych jest przyczyną poszukiwania technik montażu umożliwiających maksymalne upakowanie elementów wchodzących w ich skład. Jednym z ważnych osiągnięć mikroelektroniki jest możliwość wykonania całych systemów elektronicznych przez zintegrowanie układu scalonego oraz innych przyrządów elektronicznych, takich jak np. mikrosystemy, przyrządy optoelektroniczne, czy podzespoły radiowe i mikrofalowe w komunikacji bezprzewodowej, w obszarze jednej struktury półprzewodnikowej.

Cel ten osiągnięto, dzięki m. in. technologii SoC (*System on Chip*), pozwalającej na zwiększenie funkcjonalności struktur półprzewodnikowych oraz zmniejszenie ich wymiarów i kosztów, niestety trudnej do realizacji z powodu skomplikowanego wykonania oraz zintegrowanego projektowania.

Istnieją alternatywne metody upakowania, jak technologia SSoC (*Subsystem on Chip*), czyli upakowanie oddzielnych systemów, np. analogowe i cyfrowe na poziomie struktury półprzewodnikowej, lub technologie, pozwalające na upakowanie na poziomie wspólnego podłoża, takie jak:

- technologia SiP (*System in Package*), czyli upakowanie na poziomie półprzewodnikowej płytki podłożowej przez tworzenie stosów struktur; głównym celem jest budowa układów objętościowych typu 3D i MCM (*Multi-Chip Modules*), np. układów pamięci,

- technologia SoP (*System on Package*), czyli upakowanie na poziomie podłoża montażowego, np. organicznego, takich elementów, jak układy scalone, systemy oraz układy SiP; głównym celem jest budowa układów o dużej gęstości połączeń typu HDI (*High Density Interconnections*).

Istnieje przekonanie, że upakowanie na poziomie wspólnego podłoża jest w stanie zapewnić stopień integracji układów scalonych, gęstość upakowania oraz poziom funkcjonalności zbliżony do upakowania na poziomie struktury półprzewodnikowej.

Do najważniejszych zalet i cech upakowania na poziomie wspólnego podłoża zalicza się wykonanie między układami a podłożem połączeń drutowych, lub łączników w podłożach półprzewodnikowych, co gwarantuje małą podziałkę wyprowadzeń oraz dużą niezawodność. Inną możliwością połączenia jest stosowanie, kontaktów podwyższonych.

Metody upakowania na poziomie wspólnego podłoża wymagają usprawnienia czy opracowania nowych technologii, takich jak: tworzenie łączników w podłożu półprzewodnikowym, wykonanie połączeń o dużej gęstości, zastosowanie efektywnych metod odprowadzania ciepła, oraz wdrożenie odpowiednich technologii montażu i technik pomiarowych.

Montaż elektroniczny jest dziedziną interdyscyplinarną z obszaru fizyki, chemii, mechaniki, elektryczności, inżynierii materiałowej, inżynierii komputerowej, środowiska i metodyki projektowania, testowania i zarządzania oraz technologii: lutowania i klejenia, które pozwalają na wykonanie połączeń elektrycznych i mechanicznych między strukturą układu scalonego a obudową, ażurowym lub podłożem oraz połączenie struktury obudowanej na powierzchni płytki obwodu drukowanego, termokompresji lub zgrzewania ultradźwiękowego, za pomocą, którego wykonuje się połączenia drutowe i kontaktowych struktur układu scalonego z końcówkami wyprowadzeń obudowy, wykonania obudowy przez zgrzanie lub przylutowanie wieczka metalowego, zalanie lub zaprasowanie przetłoczone w żywicy.

Połączenia mają znaczącą rolę w funkcjonowaniu współczesnych układów elektronicznych, stanowiąc jednocześnie ich najliczniejszą grupą, przez co w dużym stopniu decydują o niezawodności urządzenia.

Przedmiotem rozprawy jest struktura i właściwości połączeń w sprzęcie elektronicznym wytwarzanych metodami mikrosparania, pośredniczące w przesyłaniu energii zasilania i sygnałów wewnątrz układu oraz mające do spełnienia funkcje konstrukcyjno - mechaniczne.

Doskonalenie metod optymalnego kształtowania struktury i właściwości mikrołączenia pozostaje w ścisłym związku z rozwojem badań nad elementarnymi zjawiskami występującymi w czasie procesu spajania w mikroskali. Znajomość zjawisk towarzyszących procesowi spajania połączona z wiedzą z zakresu technologii, znajdująca się w obszarze zainteresowań inżynierii spalania, stanowi podstawę świadomego wyboru rodzaju i struktury spojenia, najlepiej spełniających wymagania stawiane przez zadane warunki eksploatacyjne.

Istotnym krokiem w rozwoju spajania są opracowania dotyczące fizykochemicznych i metalurgicznych podstaw procesów spajania materiałów o różnym składzie chemicznym i właściwościach fizykochemicznych. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat stanowią one przedmiot publikacji. Nadal jednak szereg podstawowych i aplikacyjnych aspektów procesu spajania, również w układach elektronicznych, szczególnie materiałów o różnym składzie chemicznym i właściwościach fizycznych i mechanicznych pozostaje niewyjaśnionych, co wymaga konsekwentnej kontynuacji badań.

Problemy doskonalenia metod optymalnego projektowania technologii mikrosparania w wyniku sterowania elementarnymi zjawiskami w czasie procesu, kształtowania mikrostruktury

i właściwości złącza, znajdujące się w obszarze zainteresowań inżynierii spawalnictwa stanowią przedmiot pracy doktorskiej mgr inż. Marka Żubrowskiego.

W pracy doktorskiej Autor podejmuje próbę doboru materiałów i warunków technologicznych do wykonywania połączeń drutowych metodą spajania termokompresyjnego i ultratermokompresyjnego, opisu struktury i właściwości złączy.

Aktualny i ważny problem właściwego doboru warunków mikrospajania, warstw pośrednich oraz spoiwa stanowi jeden z elementów optymalnego kształtowania struktury i właściwości złącza, a problematyka mikrospajania w układach elektronicznych oraz właściwości technologiczne i eksploatacyjne złączy jest ciągle aktualna i stanowi dobrą tematykę rozprawy doktorskiej i właściwy wybór obszaru badań odpowiadający potrzebom rozwoju technologii.

### Ocena rozprawy

Rozprawa podzielona jest na 12 rozdziałów. Objętość rozprawy wynosi 124 strony tekstu z 94 rysunkami i 34 tabelami, a wykaz literatury obejmuje 71 pozycji.

W Rozdziale 1 pełniącym rolę wprowadzenia Autor zwięźle charakteryzuje istotę problemy rozwoju, produkcji i montażu układów elektronicznych.

W Rozdziałach 2 i 3, w oparciu o aktualną i klasyczną literaturę, analizuje technologiczne aspekty mikropołączeń elektrycznych, dobór metody spajania, jak również dokonuje charakterystyki właściwości i zastosowań materiałów podłożowych i stosowanych na nich powłok oraz drutów stosowanych na wyprowadzenia elektryczne elementów półprzewodnikowych. Wreszcie w oparciu o wykresy równowagi termodynamicznej i materiały źródłowe dokonuje oceny możliwości tworzenia się w złączu faz międzymetalicznych.

Przeprowadzone rozważania dotyczące stanu zagadnienia w wymienionych rozdziałach rozprawy doprowadziły do sformułowania w rozdziale 4 celu i programu rozprawy, którym jest zbadanie wpływu warunków technologicznych mikrospajania i rodzaju materiałów na właściwości złączy oraz próba określenia optymalnych warunków tego procesu.

Służący realizacji celu rozprawy zakres eksperymentu jest szeroki i obejmuje:

- przygotowanie podłoży do spajania ultrakompresyjnego i ultratermokompresyjnego,
- próby wykonania złączy,
- badania mikrostruktury, składu chemicznego i wytrzymałości na odrywanie wytworzonych złączy.

Badania mikrostruktury, składu chemicznego i wytrzymałości na odrywanie wytworzonych zgodnie z opisem zaprezentowanym w rozdziale 6 złączy zostały przeprowadzone na trzech grupach skojarzenia podłoża i drutu:

- laminat FR-4 z folią miedzianą złocony - drut AISi1 o średnicy 25 $\mu$ m,
- laminat FR-4 z folią miedzianą - drut AISi1 o średnicy 25 $\mu$ m,
- stop PA2 niklowany oraz złocony - drut Au o średnicy 25 $\mu$ m.

W celu realizacji planu eksperymentu Doktorant zastosował metody badawcze z obszaru inżynierii materiałowej: analizę dyfrakcyjną, mikroanalizę rentgenowską, analizę metalograficzną, badania wytrzymałości na odrywanie, badania rozkładu mikrotwardości,

oraz metody badawcze z obszaru inżynierii spajania - próby technologiczne zgrzewania i lutowania na zaawansowanej technologicznie aparaturze.

W efekcie przeprowadzonych eksperymentów Doktorant określił w Rozdziale 7 wpływ parametrów spajania na wytrzymałość na odrywanie złączy stwierdzając, że jest ona większa dla krótszych czasów procesu spajania i mniejszych wielkości sił nacisku narzędzia, przy niewielkim wpływie zmian mocy urządzenia.

Mikrostrukturę, rozkład pierwiastków i skład fazowy wraz z identyfikacją tworzących się faz międzymetalicznych i stałe sieciowe składników przedstawił w rozdziale 8 stwierdzając, zniszczenie drutu AISi1 w wyniku trawienia, brak efektów przetopienia komponentów złącza, ale wrażliwość na przypuszczenie dotyczące prawdopodobieństwa występowania minimalnej strefy przetopienia i udziału dyfuzji w procesie spajania. Na podstawie wyników mikroanalizy rentgenowskiej stwierdził występowanie gradientu zawartości pierwiastków w przekroju poprzecznym złącza, co ma potwierdzać istnienie procesów dyfuzyjnych w czasie spajania, a w wyniku rentgenowskiej analizy strukturalnej stwierdził występowanie w warstwie pośredniej śladowych ilości faz międzymetalicznych:  $AlAu_2$ ,  $AlAu$  i  $AlAu_4$ .

W rozdziale 9 Doktorant określił, na podstawie rozkładów zawartości pierwiastków w przekroju poprzecznym złączy, współczynniki dyfuzji aluminium do złota, aluminium do miedzi i złota do niklu oraz odwrotnym kierunku. Jak na warunki procesu spajania termokompresyjnego i ultratermokompresyjnego, współczynniki te wydają się wysokie.

Wreszcie, w tym samym rozdziale, w wyniku przeprowadzonych eksperymentów mgr inż. Marek Żubrowski oszacował również przykładowo wielkość naprężeń własnych w złączu laminat FR-4 z folią miedzianą - drut AISi1.

Cel pracy - zbadanie wpływu warunków technologicznych mikrospajania i rodzaju materiałów na właściwości złączy oraz próba określenia warunków tego procesu - został osiągnięty.

Rozprawa mgr inż. Marka Żubrowskiego stanowi oryginalne, wielowątkowe opracowanie z zakresu budowy i eksploatacji maszyn w obszarze inżynierii spawalnictwa. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów technologicznych mogą, po weryfikacji w warunkach przemysłowych, stanowić podstawę zastosowań praktycznych, co stanowi osiągnięcie Autora.

Najważniejszym efektem rozprawy jest zbadanie wytrzymałości na odrywanie wytworzonych złączy w zależności od rodzaju podłoża i warunków spajania oraz stwierdzenie gradientów składników drutu i podłoża w przekroju poprzecznym złącza.

Rozprawa ze względu na wyżej wymienione walory zasługuje na pozytywną ocenę, jednak w związku ze sposobem przedstawienia niektórych treści można mieć uwagi, wątpliwości i zapytania odnośnie jej fragmentów. Najważniejsze z nich są przytoczone niżej.

- Badania metalograficzne przeprowadzono wrywkowo i na podstawie ich wyników nie zostały sformułowane żadne istotne wnioski, poza ogólnym stwierdzeniem dotyczącym możliwości zaobserwowania drobnoziarnistej mikrostruktury, faktu wytrawienia komponentów złącza miedzi, prawdopodobieństwa występowania procesów dyfuzyjnych bez przetopu czasie spajania ultrakompresyjnego drutu AISi1 z podłożem  $Cu+Ni+Au$  i tworzenia się minimalnej strefy przetopienia w złączach drutu  $Au$  z podłożem  $Cu+Ni+Au$ .
- Żadne z tych twierdzeń nie wydaje się uzasadnione prezentowanymi rozprawie mikrostrukturami, prawdopodobnie między innymi z powodu przepolerowania i przetrawienia zglądów metalograficznych, nieostrych obrazów mikroskopowych w niektórych przypadkach i obecności na nich bliżej nieokreślonych składników mikrostruktury.

- Nie podano, w jaki sposób i na podstawie, jakich danych zostały określone stałe sieciowe aluminium, złota i miedzi przedstawione w tab. 8.2.
- Wykorzystane do obliczeń współczynników dyfuzji rozkłady stężenia prezentowane na rysunkach 9.9. do 9.16. i tabelach 9.1. – 9.16. zostały opracowane na podstawie rozkładów liniowych pierwiastków prezentowanych na rys. 9.1 do 9.8., mających charakter jakościowy, a przyjęte uśrednione wartości stężenia pierwiastków w punkcie  $z=0$ , prezentowane na str. 108 budzą wątpliwości.
- W podsumowaniu Doktorant dokonuje szeregu niepotwierdzonych wynikami badań interpretacji, dotyczących między innymi prawdopodobieństwa tworzenia się fazy ciekłej w czasie spajania, wpływu faz międzymetalicznych na naprężenia i możliwości ich rozrostu w czasie eksploatacji, czy też obecności dyfuzji w procesie spajania.
- Wobec obecności procesów tarcia o dużej częstotliwości w procesie spajania, gradienty stężenia pierwiastków w przekroju poprzecznym złączy na odcinku do ok. 2  $\mu\text{m}$  w głąb materiału nie muszą być efektem dyfuzji, jako aktywowanego ciepłnie transportu materii, a o takiej dyfuzji, jak sądził doktorant. Gradienty stężenia pierwiastków w przekroju poprzecznym złączy na tak krótkim odcinku mogły być efektem mechanicznego wymieszania się materiałów wskutek procesu tarcia o wysokiej dynamice. Fakt ten mógł być potwierdzony albo wykluczony w wyniku szczegółowej analizy metalograficznej z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi.
- W rozprawie znajduje się spora liczba błędów lub dowolności terminologicznych, np. materiały różnoimienne, dyfuzja wzajemna, związki międzymetaliczne, naprężenia dyfuzyjne, reagowanie aluminium i złota ze sobą, zapis analizy rentgenowskiej, optymalne parametry (bez określenia metody optymalizacji), wskazujących na nieogłębność w traktowaniu języka nauki o materiałach.
- W rozprawie znajduje się też błędy redakcyjne, ponieważ nie zmieniają istoty prezentowanych przez Autora poglądów i interpretacji zjawisk, ograniczę się do przekazania Jemu osobiście uwag dotyczących tej grupy błędów do wykorzystania w przyszłej działalności.

Przytoczone wyżej uwagi traktuję, jako dyskusję z Doktorantem lub sugestią odnośnie problemów do uwzględnienia w publikacjach i dalszych badaniach, ale wymagają one ustosunkowania się przez udzielenie bardziej szczegółowych wyjaśnień lub uzupełnień popartych, być może wynikami, których nie prezentowano w rozprawie, dotyczących sygnalizowanych w uwagach problemów.

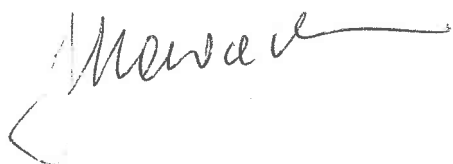
Jednak wobec odniesienia się do szeregu zagadnień dotyczących analizowanego tematu i dokonania obszernej oceny procesów spajania ultrakompresyjnego i ultratermokompresyjnego elementów elektronicznych i ich efektów, przede wszystkim wytrzymałości na odrywanie wytworzonych złączy w zależności od rodzaju podłoża i warunków spajania oraz stwierdzenia gradientów rozkładów składników drutu i podłoża w przekroju poprzecznym złącza, rozprawę, oceniam pozytywnie, jako znaczący dorobek Kandydata uzasadniający dopuszczenie do publicznej obrony.

### **Wniosek końcowy**

Na podstawie dokonanej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Żubrowskiego nt. „Wpływ warunków technologicznych mikrospajania na strukturę i właściwości użytkowe połączeń”, stwierdzam, że rozprawa dotyczy zaawansowanego i nowoczesnego procesu technologicznego a Doktorant wykazał się umiejętnością stawiania problemów naukowych i prowadzenia samodzielnej pracy badawczej, przeprowadził, bowiem obszerny i złożony eksperyment z zastosowaniem zaawansowanych metodyk badań i nowoczesnej aparatury, a

wyniki stania kolejny krok w rozwoju zastosowań inżynierii spajania w budowie zminiaturyzowanych układów elektronicznych

Dotycząca podstaw zaawansowanego procesu technologicznego opiniowana rozprawa wypełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora nauk technicznych stawiane Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. nr 65 poz. 595), przeto wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Mawad', with a long horizontal flourish extending to the right. The signature is written in a cursive style.