

dr hab. inż. Zbigniew Mirski, prof. nadzw. PWr

Wrocław, dn. 7.06.2010.

Politechnika Wrocławska

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji

ul. Łukasiewicza 5

50-371 Wrocław

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Żubrowskiego

pt.: "Wpływ warunków technologicznych mikrosparowania na strukturę i właściwości użytkowe połączeń", której promotorem jest prof. dr hab. inż. Władysław K. Włosiński dr h.c., wykonana na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki

Warszawskiej, z dn. 15 kwietnia 2010

### **1. Ocena tematu i celu pracy**

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnienia oceny wpływu parametrów procesów mikrosparowania na budowę i wytrzymałość mechaniczną złączy drutowych stosowanych w elektronice. Są to zagadnienia szczególnie istotne z punktu widzenia jakości i niezawodności połączeń mikrosparowanych, wytwarzanych w produkcji seryjnej. Ciągła miniaturyzacja podzespołów elektronicznych wymaga zwrócenia uwagi na problemy spajania bardzo cienkich, stąd o małej masie, elementów wykonanych z materiałów zaawansowanych o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych.

Przedmiotem badań były połączenia wykonane między drutami Au i AlSi1 o średnicy 25  $\mu\text{m}$  i podłożami warstwowymi, odpowiednio z Al-Ni-Au oraz Cu i Cu-Ni-Au. Połączenia wykonywano przy użyciu metod spajania utrakompresyjnego i ultratermokompresyjnego, wykorzystujących zarówno docisk mechaniczny, oddziaływanie fal ultradźwiękowych jak i temperatury (w przypadku ultratermokompresji). Spajanie utrakompresyjne może być utożsamiane ze zgrzewaniem ultradźwiękowym, który to proces jest bardziej znany pod tym terminem. Spajanie ultratermokompresyjne może być z kolei zaliczone do technik hybrydowych, w których wykorzystuje się współdziałanie kilku źródeł ciepła.

Cel pracy został przedstawiony jasno i wynika ze sformułowanego tytułu pracy, zawarto w nim także próby optymalizacji warunków procesów mikrosparowania. Tak

sformułowany cel pracy jest dobrym określeniem utylitarnego celu rozprawy. Autor realizuje jednak szerszy zakres badań. Analizuje między innymi zjawiska fizykochemiczne zachodzące podczas mikrosparania. Niezrozumiała jest jednak analiza zjawisk fizycznych i metalurgicznych zachodzących po zakończonym procesie mikrosparania, obejmującym również warunki chłodzenia (studzenia). O jakie zjawiska Autorowi chodzi, czy mogą tu występować procesy starzenia? Mgr inż. Marek Żubrowski analizuje zjawiska dyfuzyjne i efekty tych zjawisk na podstawie tworzących się faz międzymetalicznych na granicy połączeń pomiędzy drutem AlSi1 a podłożem Cu-Ni-Au w spajaniu ultrakompresyjnym oraz drutem Au a podłożem Al-Ni-Au w warunkach spajania ultratermokompresyjnego, przy oddziaływaniu temperatury ok. 150 - 200 °C. Autor rozprawy wyraźnie wskazuje na występujące w literaturze rozbieżności wynikające z oceny charakteru zachodzących zjawisk. Niektórzy autorzy wskazują na procesy adhezyjne występujące w procesach mikrosparania. Taki pogląd może wynikać ze stosunkowo niskich temperatur i bardzo krótkich czasów, rzędu 40 - 80 ms, występujących podczas mikrosparania. Złoto i aluminium, jak podkreśla Autor rozprawy, mogą tworzyć fazy międzymetaliczne już w zakresie temperatury 125 – 150 °C. W konkluzji zmierzam do stwierdzenia, że wskazane byłoby wysunięcie tezy lub sformułowanie celów naukowych o występowaniu zjawisk dyfuzji w obszarze złącza mikrosparanych materiałów. Autor bada przecież efekty zjawisk dyfuzyjnych i na podstawie przeprowadzonych badań udowadnia występowanie zjawisk dyfuzji.

Wnioski końcowe, obejmujące 6 punktów, stanowią połączenie wniosków o charakterze utylitarnym i naukowym. Wskazane byłoby wyraźne rozgraniczenie wniosków związanych z technologią procesu mikrosparania i wniosków naukowych. Podjęcie przez Doktoranta tematyki dotyczącej oceny właściwości wytrzymałościowych połączeń uzyskanych w mikrosparaniu i analizy zjawisk fizykochemicznych uważam za w pełni uzasadnione. Temat rozprawy doktorskiej jest nie tylko aktualny ale również dalece perspektywiczny, a to z uwagi na rosnące zapotrzebowanie na wdrażanie procesów mikrosparania w elektronice.

## **2. Układ pracy, ocena ogólna rozprawy**

Praca doktorska mgr inż. Marka Żubrowskiego jest pracą o charakterze eksperymentalno – analitycznym. Układ rozprawy jest całkowicie poprawny dla tego rodzaju prac. Rozprawa została podzielona na 12 rozdziałów, stanowiących dwie zasadnicze części: część teoretyczną i część badawczą. Objętość rozprawy wynosi 124 strony tekstu wraz z 96

rysunkami i 34 tabelami. W rozprawie Autor zamieścił również streszczenie pracy w języku polskim i angielskim. Wykaz literatury, stanowiący końcowy rozdział rozprawy, obejmuje 71 pozycji, w których nie zamieszczono dorobku publikacyjnego autora rozprawy. Mam nadzieję że Autor, po obronie rozprawy, wykorzysta zgromadzony materiał badawczy do zaprezentowania swoich osiągnięć.

Wprowadzenie, zamieszczone w rozdziale 1, stanowi wstęp do rozważań na temat zagadnień analizowanych, związanych z przedmiotem rozprawy. W rozdziale 2 Autor charakteryzuje metody wykonywania mikropołączeń w elektronice oraz wybór metody spajania w zależności od wykonywanych połączeń. W rozdziale 3 mgr inż. M. Żubrowski opisuje materiały do spajania, ich właściwości i wymagania im stawiane. Przeprowadza analizę układów równowagi między poszczególnymi pierwiastkami, w nawiązaniu do przedmiotu rozprawy. Rozdział 4 przedstawia krótko określony cel pracy. W rozdziale 5 Autor rozprawy przedstawia czytelny i zrozumiały program badań własnych, zarówno w opisie jak i na schemacie blokowym. W rozdziale 6 Autor opisuje przygotowanie podłoży do spajania i przedstawia warunki technologiczne wykonania mikropołączeń. Rozdział 7 obejmuje wyniki wykonanych prób wytrzymałościowych wraz z ich krótką analizą. W rozdziale 8 Autor rozprawy przedstawia wyniki badań strukturalnych połączeń przeprowadzonych metodami mikroskopii świetlnej i elektronowej. W kolejnym rozdziale 9 Autor rozprawy określa współczynniki dyfuzji na podstawie wartości stężeń pierwiastków z połączeń liczonych na podstawie rozkładów liniowych. Dokonuje również oceny wpływu dyfuzji na naprężenia własne i odkształcenia. Rozdział 10 stanowi podsumowanie rozprawy, w rozdziale 11 przedstawiono wnioski końcowe, a w rozdziale 12 spis literatury.

Oceniając część teoretyczną rozprawy należy podkreślić, iż przedstawione zagadnienia są podane w sposób zwięzły i całkowicie wystarczający. Rozważania teoretyczne stanowią jedną trzecią część rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Żebrowskiego.

Autor rozprawy wytypował materiały i przygotował podłoża warstwowe do procesów mikrospajania. Brakuje jednak informacji związanych z pełnym opisem przygotowania tych materiałów do mikrospajania. Jak były przygotowane druty, czy stosowane było odtłuszczanie, czy nie korzystniejsze byłoby przygotowanie podłoży przez trawienie chemiczne czy elektrochemiczne zamiast szlifowania i polerowania mechanicznego, szczególnie przed nałożeniem galwanicznym warstwy ze złota? Dobierając parametry mikrospajania, tj. stosując zmniejszone naciski narzędzia - kapilary i krótsze czasy mikrospajania, Autor rozprawy uzyskał najbardziej zadowalające wyniki prób wytrzymałościowych połączeń, uzyskując maksymalne siły odrywania połączeń drut AlSi1 –

podłoże Cu+Ni+Au dochodzące do 68 dN. Został tym samym udowodniony cel pracy. Trzeba podkreślić i zwrócić uwagę na znacznie większy stopień trudności badania połączeń o wielkości miniaturowej, których średnica spajanych elementów drutowych nie przekracza 25  $\mu\text{m}$ , w porównaniu z połączeniami konwencjonalnymi. Odnosi się to zwłaszcza do prób wytrzymałościowych i analizy fazowej przeprowadzanej na dyfraktometrze rentgenowskim.

Badania i analiza zjawisk dyfuzyjnych, dokonane przez Autora rozprawy, mają duże znaczenie dla rozwoju współczesnej elektroniki. Zostały przeprowadzone przy użyciu nowoczesnych metod pomiarowych i analitycznych, tj. mikroskopii elektronowej, analiz EDX (metody dyspersji wzbudzonego promieniowania rentgenowskiego) i XRD (badania składu fazowego metodą dyfrakcji rentgenowskiej). Autor rozprawy wyznaczył współczynniki dyfuzji między poszczególnymi pierwiastkami stanowiącymi materiały mikrospajane i określił wpływ tych współczynników na naprężenia własne i odkształcenia mikrostruktur spajanych. Mimo, iż niektóre z badań przy użyciu mikroskopii elektronowej zostały wykonane w innych Ośrodkach Naukowo - Badawczych, to jednak autor rozprawy udowodnił, iż bardzo dobrze dobrał metodyki pomiarowe i opanował trudności związane z analizą przeprowadzonych badań.

### **3. Uwagi ogólne i szczegółowe dotyczące rozprawy**

W rozprawie doktorskiej mgra inż. Marka Żubrowskiego, mimo wielu pozytywnych aspektów, chciałbym zwrócić uwagę na niektóre zagadnienia, o charakterze dyskusyjnym, a także na usterki i uchybienia zauważone w pracy.

#### **Uwagi dotyczące części teoretycznej pracy**

Autor rozprawy podaje wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  drutu złotego w kN. Jest to wytrzymałość na rozciąganie, która powinna być podawana w MPa. Czym różni się stan wyżarzony od stanu miękkiego dla drutu złotego (tab. 3.1, s. 29), czy chodzi tu o wyżarzanie odprężające?

Analizując układ równowagi fazowej między poszczególnymi pierwiastkami i określone fazy międzymetaliczne nie podano czy jest to w % wag. czy at. Podano również błędnie wzory stechiometryczne faz np.  $\text{AuAl}_2$  zamiast  $\text{AlAu}_2$ , czy  $\text{Au}_4\text{Al}$  zamiast  $\text{AlAu}_4$  (patrz rys. 3.3, s.35, układ równowagi fazowej Al-Au).

#### **Uwagi dotyczące wykonywania połączeń i przygotowania próbek do badań**

Autor nie podaje jak mierzono temperaturę podłoża i drutu podczas procesu ultratermokompresyjnego i na jakiej podstawie przyjęto wskazane temperatury podgrzania

materiałów spajanych, tj. 105 °C dla drutu Au i 235 °C dla podłoża? Precyzyjne określenie temperatury procesu, ułatwia analizę efektów zjawisk dyfuzyjnych.

W badaniach metalograficznych ujawniono strukturę połączeń mikrospajanych stosując odczynnik chemiczny Mi20Fe. Czy próbowano również odczynnik Mi21Cu, do ujawnienia faz międzymetalicznych? Nie podano dlaczego polerowano powtórnie próbki już wytrawione. Czy wynikało to z przetrawienia zgładów i próby właściwego ujawnienia składników mikrostruktury?

#### **Uwagi dotyczące prób wytrzymałościowych złączy**

Autor rozprawy nie podaje w jakim stanie umocnienia przeznaczono druty AlSi1 i Au do procesów mikrospajania. Nie są też określone ich właściwości mechaniczne w stanie dostawy. Przeprowadzając próby wytrzymałościowe złączy Autor nie powołuje się na stosowne normy i przepisy. Nie są podane wymagania dotyczące wartości sił odrywających w badanych połączeniach. Na podstawie danych wytrzymałościowych drutów Au i AlSi1, z części teoretycznej rozprawy, można się jedynie domyślać o jaki rząd wartości wymaganych sił chodzi. Nie jest podana w pracy wartość prędkości przesuwu uchwytu mocującego próbkę, która może mieć wpływ na wartość siły zrywającej i rodzaj zniszczenia połączenia. Według normy IEC 62137-1-1 Ed.1 zalecana prędkość przesuwu wynosi 0,5 mm/min. Stosowana prędkość przesuwu nie może powodować zniszczenia połączenia poprzez uszkodzenie podzespołu lub wyrwanie połączenia wraz z całym obszarem lutowania. Obciążanie złączy mikrospajanych w próbach wytrzymałościowych jest związane z powstawaniem złożonego stanu naprężeń, a siła odrywania (czy też wrywania) nie jest osiową siłą rozciągającą. Wynikiem próby, jak to wcześniej określa Autor rozprawy, jest siła odrywania podawana w dN. Natomiast, zarówno w opisie jak i analizie prób wytrzymałościowych ciągle określana jest wytrzymałość złączy na odrywanie, podawana w dN. Jednym z trzech rejestrowanych parametrów procesów mikrospajania jest moc, którą Autor rozprawy podaje w kHz. Prawdopodobnie wynika to z używanego żargonu technicznego. Poprawnie należałoby tu wskazywać na częstotliwość użytej fali ultradźwiękowej.

Badania wpływu poszczególnych parametrów spajania na wartość siły odrywania są przeprowadzone w sposób nieuporządkowany. Wynika to z zapisu parametrów procesów w tabelach 7.1 do 7.3. I tak nacisk na próbki jest początkowo ustalony na 25 dN, zwiększa się do wartości 27 dN, a później maleje do 23 dN. Wnioski wynikające ze zmiany parametrów technologicznych mikrospajania zostały jednak dobrze sformułowane. Przeprowadzono po 5 pomiarów dla każdej z próbek i obliczono wartości średnie sił na odrywanie. Mimo

znaczących różnic w uzyskanych wynikach, przykładowo wartości 22 i 76 dN (dla próbki nr 4 w tabeli 7.1), nie przeprowadzono analizy błędów, biorąc wszystkie otrzymane wartości do obliczenia wartości średniej. Nie przeprowadzono również analizy statystycznej uzyskanych wyników pomiarów. Niepotrzebnie podano wartości średnie z większą dokładnością aniżeli pojedyncze wartości mierzone podczas prób.

Autor rozprawy wskazuje wcześniej na przeprowadzanie badań wizualnych połączeń po zakończonych próbach odrywania. Nie bierze tego jednak pod uwagę w końcowej analizie prób wytrzymałościowych. Szkoda, ponieważ wskazują one na miejsce i charakter zniszczenia badanych połączeń mikroskajanych.

### **Uwagi terminologiczne**

W tytule rozprawy i np. w sformułowanym celu pracy Autor rozprawy podaje raz *właściwości* a za innym razem *własności* połączeń.

Wytrzymałość na rozerwanie dla drutu złotego (s. 39) nie jest właściwym określeniem, powinno być wytrzymałość na rozciąganie według aktualnie obowiązujących norm PN-EN i wcześniejszych norm PN-M.

Autor rozprawy pisze o *szybkości* poruszania się głowicy, zamiast *prędkości* poruszania się głowicy (s. 29).

Autor stosuje często określenie *badania wytrzymałościowe*, a są to tylko *próby wytrzymałościowe*.

Na rysunkach 7.2 i 7.3, na s. 49 i 50 niewłaściwie używa się terminu *proces odrywania*, właściwiej należałoby używać terminu *próba odrywania*.

Autor rozprawy podaje termin *mikroskopii optycznej*, chociaż właściwiej należałoby używać terminu *mikroskopii świetlnej*, w odróżnieniu od *mikroskopii elektronowej*, gdzie wykorzystuje się soczewki elektromagnetyczne (tzw. optykę elektronową).

### **Usterki redakcyjne i inne nieścisłości:**

- s. 11 w podpisie pod rys. 2.1, dwa razy powtórzone oznaczenia 2 i 8 – pokrywka metalowa,
- s. 14 „kontakty TAB są trudne do chronienia przed działaniem mediów” – jakich?,
- s. 15 „przy ustaleniu docisku należy brać pod uwagę *trwałość* drutu, prawdopodobnie chodzi tu o *twardość* drutu”,
- s.16 „o *wyższej* stabilności termicznej”, powinno być „o *większej* stabilności termicznej”,
- s.17 „wymagania *mechano-klimatyczne*”, powinno być „wymagania *mechaniczno-klimatyczne*”,
- s. 20 „przy *padaniu* drgań ultradźwiękowych” powinno być „przy *oddziaływaniu* drgań ultradźwiękowych”,

- s. 25 „z powodu tworzenia się *faz złoto-cyna*” powinno być „*faz z układu równowagi złoto-cyna*”,
- s.29 wytrzymałość na rozciąganie dla drutu złotego o średnicy 25  $\mu\text{m}$  podano w kN ( rząd wielkości i jednostka),
- s. 29, 31, 32 występuje duża różnorodność podawania jednostek: w kursywie, bez i w nawiasach kwadratowych,
- s. 30 „domieszkuje się je krzemem lub *manganem*”, czy tutaj nie chodzi o *magnez*?
- s. 31, tab.3.2 niewłaściwy termin „*niskoprocentowy stop miedzi*”, oznaczenia stopów są podawane raz prawidłowo AlSi1, innym razem Al4Cu, zamiast AlCu4, Al1Mg zamiast AlMg1, co to jest za stop Au-L? Przy nacisku nie podano jednostek.
- s. 32 „na podstawie wykresów *równowag fazowych*” powinno być „ na podstawie wykresów *równowagi fazowej*”, „skład chemiczny złącza będzie od 50 ÷ 100% Al”, w jakich to jest % at. czy wag?, dotyczy to np. układu równowagi fazowej Al-Cu pokazanego na rys. 3.1,
- s. 34 jest tabela 3.2, powinna być tabela 3.3,
- s. 46, 47 wskazane jest na rys. 6.1 i 6.2 naniesienie podziałki, a nie podawanie powiększenia, które często nie oddaje właściwej wielkości przy reprodukcji zdjęć.
- s. 68 podpis pod rys. 8.18, powinien być rys. 8.17, a nie rys. 8.27,
- s.90 w podpisie rys. 8.57 jest podłoże Au+Ni+Au, powinno być Al+Ni+Au.

Ponadto, w rozprawie znalazły się inne usterki, dotyczące języka i stylu, które zaznaczyłem w tekście i przekazałem Autorowi rozprawy doktorskiej.

Mimo przedstawionych uwag, często o charakterze dyskusyjnym, pragnę podkreślić że nie umniejszają one wartości merytorycznych recenzowanej rozprawy doktorskiej. Mam również przekonanie, że niektóre z nich zostaną wykorzystane w dalszej działalności naukowo-badawczej Autora rozprawy.

#### 4. Wniosek końcowy

Po dokładnym zapoznaniu się z przekazaną mi do oceny rozprawą doktorską stwierdzam, że mgr inż. Marek Żubrowski wykazał się dużą umiejętnością formułowania i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Umiejętnie przeprowadził badania eksperymentalne z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury kontrolno-pomiarowej. Wykazał się wiedzą w zakresie inżynierii materiałowej, technik pomiarowych oraz podstaw technologii spajania. Uważam, że niniejsza rozprawa stanowi oryginalny i istotny wkład w rozwój

inżynierii spajania i mieści się w obszarze dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn, a osiągnięte wyniki mają zarówno duże znaczenie naukowe jak i praktyczne.

Stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Marka Żubrowskiego pt.: "Wpływ warunków technologicznych mikrosparowania na strukturę i właściwości użytkowe połączeń" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Milski". The signature is written in a cursive style with a large initial 'M'.