prof. dr hab. inż. Maciej Sibiński
Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
ul Stefanowskiego 18
90-537 Łódź

Łódź 02.11.2026

# RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

## mgr inż. Adriana Michała Pietruszki

## *Analiza wpływu warunków montażu powierzchniowego na parametry termiczne tranzystorów*

**Promotor:**

**dr hab. Agata Skwarek-Illés**

**Promotor pomocniczy:**

**dr hab. Paweł Górecki**

### 1. Aktualność i oryginalność tematyki.

Problemem badawczym poruszanym w recenzowanej pracy jest poprawa właściwości termicznych, przy utrzymaniu parametrów mechanicznych i elektrycznych stopów lutowniczych przeznaczonych do wykonywania połączeń lutowanych tranzystorów na płytkach drukowanych. Jest to zagadnienie niezwykle popularne ze względu na olbrzymią skalę produkcji tego typu układów w obecnym etapie rozwoju przemysłu elektronicznego. Zwiększająca się liczba tranzystorów jak również rosnące ilości rozpraszanej energii w układach elektronicznych w sposób nieunikniony prowadzą do występowania ograniczeń termicznych, limitujących możliwości skali integracji i szybkości działania a także dopuszczalnych pułapów wykorzystywanych mocy jednostkowych w takich układach. Pomimo długiej historii rozwoju tego rodzaju połączeń modyfikacje składu past lutowniczych, wymuszone dążeniem do ograniczenia stosowania materiałów szkodliwych oraz trudnodostępnych wprowadziły dodatkowe ograniczenia w przebiegu procesu lutowania.

Odpowiedzią na te ograniczenia może być wykorzystanie jako wzmocnień połączeń lutowniczych dodatków nowego rodzaju materiałów jak np. nanoform węgla czy też dodatków w postaci tlenków $TiO_2$, $SiO_2$ i $ZrO_2$ do połączeń lutowanych na bazie SAC305. Prace tego rodzaju były już prowadzone od drugiej dekady XXI wieku i fragmentarycznie publikowane przez grupę autorów. Podobnie, badany przez Doktoranta dodatek nanocząstek $Al_2O_3$ do lutowia SAC305 oraz SAC0307 był już

przedmiotem wielu badań, obejmujących mikrostrukturę, właściwości mechaniczne, zwilżalność i niezawodność połączeń. Tym niemniej w literaturze brak jest kompletnych doniesień na temat wszechstronnego i zobiektywizowanego porównania różnorodnych parametrów eksploatacyjnych połączeń lutowniczych wykonanych przy umocnieniach na bazie nanorurek, nanowłókien i nanoproszków, wykonanych w identycznych warunkach procesu. Dodatkowo jako podstawowy aspekt nowości postrzegam zestawienie tych parametrów z właściwościami termicznymi wykonywanych połączeń pod kątem efektywnego odprowadzania ciepła ze struktury tranzystorów w obudowach SMT. Z tego względu tematykę pracy należy ocenić jako istotną i aktualną dla rozwoju współczesnej elektroniki a zaproponowane rozwiązania konstrukcyjne jako ciekawą ścieżkę badawczą prowadzącą do wdrożenia korzystnej alternatywy dla tradycyjnej kompozycji past lutowniczych.

## 2. Wymogi formalne oraz ocena przyjętego układu i poprawności edycyjnej rozprawy doktorskiej. Teza i cel rozprawy

Doktorant spełnia z naddatkiem wymogi formalne stawiane kandydatom do stopnia doktora nauk technicznych. W szczególności jest autorem, lub współautorem czterech artykułów naukowych, indeksowanych w bazie WoS oraz czterech publikacji konferencyjnych a także jednego zgłoszenia patentowego. Wszystkie publikacje Autora powstały w toku współpracy z promotorem a ich łączna ilość cytowań (bez autocytowań) wynosi 82 co świadczy o istotnej rozpoznawalności naukowej.

Przedstawiona do oceny praca ma formę monografii naukowej składającej się z siedmiu rozdziałów numerowanych, spisu wykorzystanej literatury, oraz krótkiej prezentacji sylwetki naukowej Autora. Publikacja została ponadto opatrzona wykazem zastosowanych symboli oraz skrótów i oznaczeń wykorzystywanych w tekście pracy oraz poprzedzona streszczeniem w języku polskim i angielskim.

Cel pracy został sformułowany dosyć ogólnie w rozdziale 2.3 a także podany w jej streszczeniu. W dysertacji brak jest wyodrębnionych celów szczegółowych oraz hipotezy badawczej. Należy podkreślić, że elementy te nie są obowiązkowe w rozprawie doktorskiej, choć są przydatne do usystematyzowania realizacji i oceny wnyków badań. Znalazło to swoje odbicie również w sekcji wniosków recenzowanej pracy, która jest złożona i wielowątkowa.

Struktura dysertacji odpowiada w ogólności układowi IMRAD i jest właściwa dla prac doktorskich, jednakże praca jest wyjątkowo obszerna a poruszane w niej wątki dotyczą zarówno analizy teoretycznej, symulacji jak i różnorodnych eksperymentów technologicznych i pomiarowych. Taki zakres i układ pracy stawia istotne wyzwanie w zakresie jej spójności i przejrzystości oraz stwarza miejsce do drobnych błędów formalnych i edycyjnych. Można do nich zaliczyć następujące uwagi:

- Pomimo ogólnie poprawnego przygotowania tekstu rozprawy w pracy występują liczne drobne usterki edycyjne, niepoprawna składnia tekstu, powtórzenia i różnorodne błędy gramatyczne a także wielokrotne literówki.

- Nie wszystkie występujące skróty i oznaczenia są wyjaśnione w wykazie zamieszczonym na wstępie pracy. Niektóre z nich opisano w tekście pracy (np. MTTF) a inne podano w zarówno w wykazie jak i opisano w tekście pracy (np. PCB) co wprowadza niepotrzebny chaos.

- Nie wszystkie cytowane pozycje literaturowe stanowią aktualne źródła wiedzy, zwłaszcza biorąc pod uwagę intensywny rozwój elektroniki i technologii materiałowych od początku XXI w.

- Również nie w każdym przypadku podano źródło wykorzystywanych obiektów graficznych (np. rys 2.3 czy 2.4). Niektóre z nich zostały zamieszczone w zbyt niskiej rozdzielczości. Rysunki nie zawsze zostały opatrzone wyczerpującą legendą z pełnym opisem wykorzystywanych skrótów i oznaczeń.

Powyższe błędy nie utrudniają w stopniu znaczącym odbioru treści merytorycznych pracy, jednak nie powinny mieć miejsca w dysertacji doktorskiej.

## 3. Rozwiązanie postawionego zadania – metody badawcze i samodzielność autora.

Przyjęty przez Autora program badawczy opierał się o wstępne rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy z zakresu technologii wykonania połączeń lutowniczych elementów przeznaczonych do montażu powierzchniowego oraz składu i budowy wykorzystywanych obecnie past lutowniczych. Na tej podstawie Doktorant wytypował grupę potencjalnych składników umocnień popularnych past bezołowiowych, wykonanych na bazie nanoform SiC, $TiO_2$ i $Al_2O_3$, które przebadał zarówno pod kątem właściwości reologicznych otrzymanych past jak również ze względu na uzyskane parametry mechaniczne i termiczne wytworzonych połączeń lutowanych.

Do tego celu w celu podniesienia walorów aplikacyjnych wykorzystał popularnie stosowane rodzaje urządzeń i profili lutowniczych. Ostateczną weryfikacją eksperymentalną jakości wytworzonych połączeń było badanie wpływu procesu montażu powierzchniowego, w tym profilu temperaturowego na parametry termiczne tranzystorów IGBT w obudowach TO-263 ($D^2PAK$). Prace eksperymentalne uzupełniono o analizę symulacyjną w programie ANSYS, której celem było modelowanie wpływu rezystancji termicznej połączenia lutowanego oraz materiału podłoża na parametry termiczne tranzystorów MOSFET. W toku pracy wykorzystano również autorską metodę pomiaru pośredniego impedancji termicznej, opracowaną w jednostce Doktoranta.

Zaproponowaną metodykę badań należy ocenić jako właściwą i kompletną w odniesieniu do przyjętego zakresu i celu pracy. Na podstawie przedstawionego przebiegu eksperymentów, krytycznej analizy uzyskanych wyników, oraz wykorzystywanych metod badawczych należy stwierdzić, że Autor posiadł rozległą wiedzę z zakresu:

- Zjawisk cieplnych zachodzących w elementach elektronicznych
- Metod modelowania i obrazowania efektów termicznych w przyrządach półprzewodnikowych
- Technologii wykonania połączeń lutowniczych dla elementów i układów elektronicznych
- Podstawowych metod badawczych służących do pomiarów parametrów elektrycznych, termicznych oraz budowy morfologicznej struktury elementów i układów elektronicznych
- Samodzielnego opracowania i prowadzenia programu badań naukowych
- Przygotowania i publikacji komunikatów naukowych w czasopismach recenzowanych.

Za szczególnie istotne osiągnięcie pracy uważam kompleksowe podejście do badania właściwości wytwarzanych połączeń lutowniczych przy uwzględnieniu przygotowanych umocnień obejmujących ich wszystkie najważniejsze parametry mechaniczne i termiczne. Jednocześnie w pracy uwzględnione zostały najbardziej popularne metody i urządzenia stosowane zarówno w procesie lutowania przemysłowego jak i przy montażu w małej skali produkcyjnej. Z tego względu otrzymane wnioski są w pełni uprawnione i wnoszą cenny walor aplikacyjny.

## 4. Uwagi krytyczne i zastrzeżenia do treści rozprawy doktorskiej

Praca prezentuje przekrojowe badania podjętego tematu naukowego w ujęciu eksperymentalnym i symulacyjnym, jednak analizując szczegóły raportowanych badań można sformułować szereg uwagi i pytań merytorycznych. W szczególności należy wyjaśnić następujące kwestie:

1. Z jakiego powodu do badań porównawczych (opis zamieszczony w rozdziale 3.1) zastosowano trzy substancje w formie nanokompozytów jednak tylko dwie z nich (z wyłączeniem $TiO_2$) w postaci nanowłókien? Nanowłókna tego typu mogą być z powodzeniem stosowane jako składnik past lutowniczych i mogą silniej oddziaływać na mikrostrukturę lutowia dzięki dużemu stosunkowi długości do średnicy. Jest to technicznie możliwe i interesujące z punktu widzenia badań nad niezawodnością połączeń lutowanych, szczególnie w elektronice mocy.

2. Ponadto korzystne byłoby sprawdzenie tych samych rodzajów nanokompozytów we wszystkich rodzajach testów (zrywanie, zwilżalność, temperatura topnienia) tak aby uzyskać właściwą bazę do porównania ich właściwości. W toku pracy w różnych badaniach wykorzystywano różne formy umocnień co utrudnia obiektywne i przekrojowe porównanie badanych materiałów.

3. Czy w tekście rozdziału 3.1 na stronie 32 podano właściwą wielkość dotyczącą średnicy nanowłókien SiC (D < 2,5μm)? Przy jednoczesnej długości włókien na poziomie powyżej 50μm trudno zakwalifikować je jako nanoformy. Ponadto w praktyce dla nanowłókien SiC stosowanych jako dodatki wzmacniające do kompozytów szczególnie interesujący jest inny zakres średnic: 50÷300 nm. Dlaczego nie zastosowano materiału tego typu w prowadzonych pracach?

4. Czy nanokompozyty z zastosowaniem nanowłókien przygotowywano w młynie kulowym? W jakim stopniu wpływało to na skracanie włókien, ich pękanie oraz powstawania defektów strukturalnych? Czy do tego celu wykorzystano kule mielące? Czy nie rozważano innej formy przygotowania pasty - np.: homogenizacja w mieszalniku próżniowym?

5. Wyniki dotyczące wartości siły ścinania dla badanych kompozytowych stopów lutowniczych a zwłaszcza ich zaproponowana interpretacja graficzna wydają się bardzo dyskusyjne. Ile próbek tych połączeń łącznie wykonano i przebadano? W jaki sposób uśredniono wyniki? Dlaczego w każdym przypadku zaproponowano liniowy charakter trendu? Ile wynosiły wartości współczynników determinacji dla zaproponowanych modeli linii trendu? W jaki sposób uzyskano wyniki referencyjne?

6. Dlaczego rozważania Autora dotyczące możliwych przyczyn zmian zwilżalności zastosowanych kompozytów lutowniczych przedstawione w rozdziale 3.6 opierają się jedynie o domniemane teoretyczne wyjaśnienia na bazie zakładanych zmian morfologicznych i nie zostały poparte żadnym badaniem z wykorzystaniem np. mikroskopii optycznej, SEM/EDS, metalografii przekrojów czy też analizy fazowej XRD. Bez jakiegokolwiek dowodu naukowego przedstawione spekulacje nie posiadają znaczącej wartości poznawczej.

7. Czy wyniki badania pustek lutowniczych, zaprezentowane na Rys 4.13 oraz w tekście rozdziału 4.3.2 pracy a także poglądowo w formie wybranych próbek na Rys 4.21 oraz 4.29-4.31 są wynikami uśrednionymi w sposób analogiczny jak np. w przypadku danych prezentowanych w rozdziale 4.3.1? Jeśli tak to w jaki sposób zmierzono i uśredniono powierzchnie pustek? W tekście pracy brak jest szczegółowych informacji na ten temat.

8. Czy sam spadek grubości faz międzymetalicznych w wytworzonych połączeniach lutowanych był celem prowadzonych badań? Czy dalsze obniżanie ich grubości poniżej wartości 1μm, opisane np. w rozdziale 4.3.3. przy jednoczesnej migracji wewnętrznej nie stanowi w opinii Autora zagrożenia dla niezawodności połączenia lutowanego?

9. Przy analizie powierzchni pustek lutowniczych Autor wielokrotnie podkreśla, że obserwowane zmiany parametrów termicznych połączeń lutowniczych nie muszą wynikać wyłącznie ze zmiany udziału pustek, lecz również przez zmiany mikrostruktury spoiny lutowniczej wywołane obecnością dodatku nanocząstek,

w tym zmiany morfologii faz międzymetalicznych, rozkładu cząstek wzmacniających oraz jednorodności struktury lutowia. Korzystne byłoby zestawienie wszystkich wyników wskazanych parametrów w formie jednej metaanalizy w celu kompleksowej oceny i obiektywnego porównania badanych stopów.

10. W rozdziale 5 przedstawiono eksperymentalne badanie wpływu wybranej techniki wytwarzania połączenia lutowanego dla tranzystora IGBT w obudowie SMT na parametry mechaniczne i impedancje termiczne wytworzonych stopów. Jest to ciekawe badanie porównawcze obejmujące aż pięć metod lutowania, jednak wszystkie próby wykonano dla standardowej pasty SAC0307. Z jakiego powodu Autor zaniechał badania zmodyfikowanych past opracowanych w toku wcześniej prezentowanych eksperymentów?

11. Ponownie korzystne byłoby wykonanie w rozdziale 6 symulacji rezystancji termicznych dla wszystkich badanych typów past i umocnień, co stanowiło główne zagadnienie pracy zamiast jedynie dla dwóch rożnych rodzajów podłoży PCB. Z jakiego powodu nie przeprowadzono tego typu symulacji?

12. Rozkłady temperatury przedstawione jako wyniki symulacji na Rys 6.5 wydają się nie do końca poprawne. W jaki sposób można wyjaśnić niższą temperaturę wyprowadzeń G i S w punktach ich kontaktu z obudową tranzystora będącego źródłem wydzielanego ciepła w układzie niż przy polach lutowniczych?

W celu podniesienia jakości merytorycznej uzyskanych wyników wskazane jest krytyczne odniesienie się do powyższych punktów oraz ich uzupełnienie i rozwinięcie w toku dalszych prac badawczych.

## 5. Ocena końcowa

Pomimo wskazanych uwag krytycznych wysoko oceniam poziom naukowy, wkład i organizację pracy badawczej oraz jakość i wagę otrzymanych wyników Doktoranta w uprawionej dyscyplinie naukowej. Przedstawiona rozprawa potwierdza wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Ponadto w świetle prezentowanych wyników stwierdzam oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego dotyczącego poprawy parametrów odprowadzania ciepła w połączeniach lutowanych elementów elektronicznych. Na tej podstawie stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi stawiane w art. Art. 186 oraz 187 Ustawy z dnia z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

PODPIS ZAUFANY
MACIEJ
SIBIŃSKI
02.11.2026 12:13:27 GMT+1
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym