

Dr hab. inż. Dorota Szwagierczak
Sieć Badawcza Łukasiewicz-Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Oddział w Krakowie
ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków
dorota.szwagierczak@imif.lukasiewicz.gov.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr inż. Witolda Nawrota
pt. „Application of Additive Manufacturing in Ceramic-Polymer Microsystems”
(„Zastosowanie wytwarzania przyrostowego w mikrosystemach ceramiczno-
polimerowych”)

Podstawa formalna

Podstawą formalną do sporządzenia recenzji było powołanie mnie uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej w dniu 13 czerwca 2022 r. na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Witolda Nawrota zatytułowanej „Application of Additive Manufacturing in Ceramic-Polymer Microsystems” oraz pismo Przewodniczącego w/w Rady z dnia 23.06.2022 z informacją w tej sprawie.

Recenzję wykonano zgodnie z art. 179 ust.1 i ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z dnia 30 sierpnia 2018 r. poz. 1669) w związku z art. 13, art.14 ust.1 pkt 1, ust.2 pkt 1 i ust.4 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora – Rozdział 1 - Szczegółowy tryb przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich (Dz.U. z 2011 r., poz. 1200).

Omówienie rozprawy doktorskiej

Praca doktorska została wykonana pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. Karola Malechy i Prof. Dr.-Ing. Jensa Müllera jako kopromotorów, w ramach współpracy zespołów badawczych z Politechniki Wrocławskiej (Department of Microsystems, Wrocław University of Science and Technology) i Politechniki w Ilmenau w Niemczech (Institute of Micro and Nanotechnologies, Technical University Ilmenau), dwóch wiodących ośrodków mających wieloletnie doświadczenie i dorobek badawczy dotyczący technologii LTCC. Praca była współfinansowana przez Unię Europejską w ramach projektu POWR.03.02.00-00-I003/16.

Rozprawa doktorska poświęcona jest bardzo aktualnej i ważnej tematyce otrzymywania struktur przestrzennych technologią wytwarzania przyrostowego (ang. Additive Manufacturing AM), popularnie nazywaną „drukowaniem 3D”. Jest to technologia przyjazna dla środowiska i uniwersalna co do zakresu zastosowań dzięki selektywnemu, precyzyjnemu dodawaniu materiału jedynie w zaplanowanych miejscach z wykorzystaniem

numerycznych symulacji, co umożliwi lepszą kontrolę kształtu nanoszonych warstw i ogranicza zużycie materiału.

Technologia ta jest z powodzeniem stosowana w mikro- i nano inżynierii, m.in w implantologii i przemyśle lotniczym. Stanowi ważną część przemysłu 4.0 ukierunkowanego na zautomatyzowane autonomicznie działające fabryki.

Doskonalenie materiałów i metodyki wytwarzania oraz poszerzenie zakresu zastosowań technologii AM w zaawansowanych mikroelektronicznych mikrosystemach jest trudnym i znaczącym wyzwaniem. W rozprawie zaproponowano wykorzystanie jednej z najpowszechniej stosowanych metod AM, stereolitografii SL, do wytwarzania ceramicznych i ceramiczno-polimerowych mikrosystemów przy użyciu niedrogich, powszechnie dostępnych urządzeń. Celem było stworzenie tańszej, a zarazem w niektórych zastosowaniach lepszej alternatywy lub uzupełnienia dla technologii LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics - ceramika współwypalana w niskich temperaturach), która obecnie dominuje w zakresie wytwarzania mikrosystemów.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim. Ma 208 stron, zawiera 81 rysunków, 10 tabel, 136 pozycji bibliograficznych. Praca podzielona jest na dwie części – część pierwszą mającą charakter teoretycznego wprowadzenia (*Part I. Introduction*) oraz część drugą przedstawiającą wyniki badań eksperymentalnych i ich dyskusję (*Part II. Original Research*). Część I złożona jest z 3 rozdziałów - *Chapter 1. Aim and Scope*, *Chapter 2. Ceramic Microsystems* i *Chapter 3. Additive Manufacturing*. Część II złożona jest z kolejnych 3 rozdziałów *Chapter 4. Cer-AM in Microsystems*, *Chapter 5. Ceramic-Polymer Microsystems* i *Chapter 6. Conclusion*. Ponadto rozprawa zawiera streszczenie, spis treści, spis akronimów i bibliografię. Główne rozdziały rozprawy zawierają na początku podrozdział będący formą wstępu mówiącego o zawartości rozdziału oraz na końcu podrozdział stanowiący podsumowanie, co ułatwia czytelnikowi zrozumienie treści całości rozdziału. Dla przejrzystości opisu korzystne jest również zamieszczenie w odrębnych podrozdziałach zwięzłego opisu zastosowanych metod analitycznych i zastosowanej aparatury badawczo-pomiarowej.

W Rozdziale 1 Autor jasno określił cele i zakres pracy doktorskiej. Sformułował główny cel pracy, którym było rozszerzenie możliwości mikrosystemów ceramicznych oraz zwiększenie ich dostępności poprzez wprowadzenie niedrogich metod wytwarzania przyrostowego i łączenie z polimerami.

Rozdział 2 zawiera opis technologii LTCC i technologii grubowarstwowej stosowanych do wytwarzania wielowarstwowych podłoży i obudów oraz ceramicznych mikrosystemów dla mikroelektroniki. Technologia LTCC stanowiła w rozprawie główny punkt odniesienia przy ocenie parametrów elementów wytwarzanych metodą przyrostową. Omawiając zalety i wady LTCC, wskazano również obszar nowych możliwości, przede wszystkim w zakresie bardziej zaawansowanej strukturyzacji przestrzennej, które stwarza wprowadzenie metody przyrostowej.

W Rozdziale 3 omówiono krótko wszystkie istniejące metody wytwarzania przyrostowego. Bardziej szczegółowo opisano stosowane materiały, urządzenia, etapy procesu, możliwości zastosowań i występujące problemy dla stereolitografii (SL) jako metody wybranej w pracy doktorskiej do wytwarzania mikrosystemów. W Tabeli 3.1 w przejrzysty i syntetyczny sposób porównano zalety i wady różnych metod AM. Rozdział ten stanowi cenną popularyzatorską prezentację stanu wiedzy w zakresie technologii AM, w sytuacji gdy brakuje prac przeglądowych na ten temat. Autor przeprowadził również dyskusję możliwości zastosowania metody AM z punktu widzenia małych/średnich firm i laboratoriów badawczych, których nie stać na kosztowne, bardziej zaawansowane wyposażenie.

W obszernym Rozdziale 4 rozpoczynającym prezentację wyników prac eksperymentalnych, przeprowadzono ocenę możliwości zastosowania komercyjnych

kompozycji ceramiczno-polimerowych do wytwarzania mikrosystemów ceramicznych i przedstawiono charakterystykę autorskich kompozycji. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano niesatysfakcjonujące właściwości komercyjnych materiałów dostosowanych do niedrogich urządzeń SL. Autor podkreślił, że komercyjne kompozycje ceramiczno-polimerowe nie zostały zaprojektowane dla technologii mikroelektronicznych i nie bardzo się nadają do tych zastosowań ze względu na nieodpowiednie temperatury obróbki termicznej lub właściwości dielektryczne i termiczne.

Aby sprostać wymaganiom dla zaawansowanych ceramicznych mikrosystemów, jako jeden z ambitnych celów pracy doktorskiej Autor wyznaczył opracowanie oryginalnych światłoczułych kompozycji o ulepszonych parametrach. Doktorant dobrze zdefiniował związane z tym celem problemy badawcze i zaproponował sposoby ich rozwiązania. W oparciu o wyniki badań wskazał, że kluczowymi parametrami technologicznymi są: udział ceramicznego wypełniacza, odpowiednia lepkość kompozycji, właściwie dobrana energia naświetlania i profil wypału. Parametry te decydują o zapewnieniu dobrych warunków do druku, właściwej adhezji do platformy urządzenia, dobrej mechanicznej integralności w stanie surowym i dobrym stopieniu utwardzenia żywicy. Autor wykazał, że tylko optymalizacja tych parametrów może dać w efekcie końcowym element bez wypaczeń i pęknięć oraz równocześnie bez nadmiernej porowatości i skurczu po wypaleniu.

Autor zaproponował i zrealizował kilka nowych oryginalnych wariantów procesu, jak wytwarzanie kanałów o profilu otwartym, hybrydową metodę strukturyzacji przyrostowo-ubytkowej, łączenie elementów przy użyciu szkliwa lub ceramicznej żywicy światłoczułej. W związku z trudnościami i ograniczeniami związanymi z wytwarzaniem zamkniętych profili, zaproponowano nowy sposób wytwarzania otwartych profili, które w następnych krokach były zamykane. Najmniejsze wytworzone z powodzeniem kanały mikroprzepływowe miały 150 mikrometrów szerokości i 500 mikrometrów głębokości, co jest wynikiem porównywalnym z danymi przytaczanymi w literaturze. Metodą tą wykonano testowy mikrosystem stanowiący ceramiczną miniaturową chłodnicę. Przeprowadzone badania uwidaczniają skalę trudności, jakie musiał Autor pokonać, aby osiągnąć postawiony cel w postaci autorskiej kompozycji ceramiczno-polimerowej o właściwościach odpowiednich dla mikrosystemów mikroelektronicznych.

Opracowane przez Autora autorskie ceramiczne żywice dla technologii SL oparte były na komercyjnej żywicy Tethon Genesis High Load, specjalnie zaprojektowanej do łączenia z nieorganicznymi wypełniaczami. Jako funkcjonalny ceramiczny wypełniacz zastosowano 3 rodzaje proszków szklano-ceramicznych wykorzystywanych w technologii LTCC – dwie z firmy Heraeus i jedną eksperymentalną kompozycję z Instytutu Fraunhofera IKTS. Dla opracowanej kompozycji ceramiczno-polimerowej Autor przeanalizował skład, reologię, światłoczułość, zdolność do drukowania elementów o skomplikowanym kształcie, warunki obróbki termicznej, jakość powierzchni, właściwości dielektryczne oraz przeprowadził porównanie właściwości autorskiej kompozycji i materiałów opisanych w literaturze. W oparciu o wyniki analizy termogravimetrycznej Autor wskazał 65% jako maksymalny udział ceramicznego wypełniacza, przy którym możliwe jest zachowanie odpowiedniej wytrzymałości w stanie surowym dzięki wiążącej roli polimeru.

W ramach pracy doktorskiej dla zademonstrowania jakości opracowanych materiałów i możliwości opracowanej procedury, jako testowe modele wykonano z sukcesem wieże szachowe o bardzo skomplikowanym spiralnym kształcie, wymagające dużej precyzji wykonania. Ważnym osiągnięciem było także uzyskanie dobrej kompatybilności opracowanej kompozycji z niedrogimi urządzeniami typu Formlabs Form 2 i Asiga MAX.

Metodą analizy termicznej szczegółowo badano profil wypału i za najlepsze rozwiązanie uznano bardzo wydłużony w czasie przebieg procesu usuwania organicznych składników oraz niższą temperaturę spiekania części ceramicznej (850°C) odpowiadającą temperaturze

spiekania ceramiki LTCC. Profil ten znacząco różnił się od profilu stosowanego dla komercyjnych ceramicznych żywic. Znaczącym sukcesem było uzyskanie niezwykle wysokiego stopienia zagęszczenia na poziomie 98% gęstości teoretycznej, co stanowiło podstawę do dobrych właściwości dielektrycznych i mechanicznych wytworzonych elementów. Duży skurcz występujący w wyniku obróbki termicznej był równomierny w obszarze całego elementu i nie powodował jego deformacji. Ważną zaletą elementów wytworzonych z autorskich kompozycji, a w szczególności tej opartej na drobnoziarnistym proszku LTCC z Instytutu Fraunhofera, z punktu widzenia zastosowania w mikroelektronice była także możliwość uzyskania większej gładkości powierzchni niż w przypadku zastosowania komercyjnych kompozycji.

Analizując wnikliwie wyniki przeprowadzonych badań, Autor wskazał najważniejsze czynniki, które mogą być przyczyną, niekorzystnego w wielu zastosowaniach mikroelektrycznych, pogorszenia właściwości dielektrycznych finalnego elementu ceramicznego. Są to delaminacja spowodowana niedostatecznym stopniem utwardzenia i porowatość związana z niedostatecznie dobrym stopniem spieczenia elementu. Autor wykazał, że można uniknąć tych defektów w przypadku zastosowania autorskiej kompozycji ceramiczno-polimerowej. W konsekwencji możliwe było uzyskanie parametrów dielektrycznych dla częstotliwości 1-10 GHz porównywalnych z materiałem wytworzonym technologią LTCC, co stanowi ważne osiągnięcie pracy doktorskiej.

Przedstawiono wyniki najnowszych prac przeprowadzonych w innych ośrodkach, opublikowanych w trakcie realizacji pracy doktorskiej, które dotyczą podobnej tematyki koncentrującej się na opracowaniu materiałów dla stereolitografii zawierających bardzo duży udział ceramicznych cząstek. Rezultaty tych prac, jakkolwiek obiecujące, są przeznaczone do wykorzystania w innych, znacznie bardziej kosztowych urządzeniach i są niekompatybilne z tanimi urządzeniami SL, dla których opracowano z powodzeniem kompozycje przedstawione w rozprawie. Wspomniane prace innych autorów świadczą jednak o aktualności i znaczeniu podjętej w rozprawie tematyki.

W Rozdziale 5 opisano przykłady wykorzystania opracowanych materiałów i metod do wytwarzania zaawansowanych mikrosystemów, w których zastosowano połączenie materiałów ceramicznych z polimerowymi w finalnym produkcie. Były to zastosowania optoelektryczne, które dawały możliwość zademonstrowania połączenia zalet obu rodzajów materiałów – różnorodności składów i dobrego przewodnictwa cieplnego materiałów ceramicznych oraz przezroczystości optycznej polimerów, ich szybkiego procesu utwardzania i możliwości łączenia w temperaturze pokojowej. Autor zaproponował nowe interesujące rozwiązanie w zakresie procedury wspomaganego plazmą procesu wiązania PDMS/LTCC, pozwalające na lepszą kontrolę przebiegu procesu i ochronę wrażliwych na temperaturę materiałów. Rozwiązanie to polega na zastosowaniu odpowiednio ukształtowanych elektrod, dzięki którym można lepiej zdefiniować obszar rozładowania plazmowego i umożliwić selektywną modyfikację powierzchni bez narażenia na uszkodzenie np. zagrzebanego wrażliwego materiału biologicznego. Dla rozwiązania problemów z nadmierną reaktywnością, zastosowano metody pokrywania szkliwem i osobnego wypału. Ważnym problemem do rozwiązania w pracy było zbadanie czy wolne rodniki obecne w plazmie mogą migrować i oddziaływać z materią poza obszarem rozładowania, prowadząc do degradacji czułego materiału. Brak tego niekorzystnego efektu udowodniono na podstawie badań kąta zwilżania, który zmienia się po reakcji z wolnymi rodnikami oraz badania metodą spektroskopii w podczerwieni FTIR.

Jako dodatkową metodę wytwarzania ceramiczno-polimerowych mikrosystemów opracowano metodę bezpośredniego druku 3D materiałów polimerowych na zmodyfikowanych podłożach ceramicznych w celu otrzymania funkcjonalnej obudowy. Stwierdzono, że możliwe jest wytwarzanie kanałów mikrofluidycznych i optycznych

elementów jak soczewki i równocześnie wykonanie w ceramicznej strukturze układu elektronicznego wraz z aktywnymi elementami SMD, grzejnikami, biowarstwami. Głównym problemem była słaba adhezja nadrukowanych elementów do ceramicznego podłoża. Autor zaproponował wyeliminowanie tego problemu dzięki zastosowaniu laserowego grawerowania powierzchni podłoża. Po takiej obróbce uzyskano bardzo dużą wytrzymałość połączenia. Dla oceny mechanicznej wytrzymałości wytworzonych mikrosystemów przeprowadzono wymagające testy na rozerwanie (burst tests), pozwalające na ilościową ocenę dopuszczalnych progowych ciśnień w układach mikrofluidycznych.

W Rozdziale 6 dokonano podsumowania otrzymanych wyników i głównych osiągnięć pracy doktorskiej oraz wskazano perspektywy aplikacyjne opracowanej technologii.

Bibliografia przedstawiona w rozprawie zawiera 136 pozycji, w tym aż 60 pozycji pochodzi z ostatnich 6 lat, co świadczy o znajomości przez Autora najnowszej literatury dotyczącej przedmiotu rozprawy. Wśród cytowanych pozycji jest 13, których współautorem jest mgr Witold Nawrot, co świadczy o jego znaczącym dorobku publikacyjnym w obszarze prezentowanej tematyki badawczej. Spośród nich 4 są to publikacje w czasopismach z listy JCR – 3 w Sensors ($IF_{5\text{year}}=4.05$) i jedna w Microelectronics International ($IF_{5\text{year}}=0.895$) raz jedna w czasopiśmie spoza listy JCR (Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science). Pozostałe pozycje to publikacje w materiałach konferencyjnych. Mgr Nawrot jest pierwszym autorem w 4 publikacjach w czasopismach i w 5 publikacjach konferencyjnych.

Uwagi krytyczne

Krytyczne uwagi i komentarze dotyczące rozprawy, które nie wpływają na wysoką ocenę wartości merytorycznej pracy, są następujące:

1. Za niezręczne uważam wielokrotne stosowanie skróconego określenia “Resin” zamiast np. „Ceramic-polymer composite” lub ewentualnie uproszczenia “Ceramic resin” jako głównej nazwy dla opracowanych kompozycji polimerowo-ceramicznych. Prowadzi to czasem do całkowicie błędnie brzmiących stwierdzeń, jak w zdaniu “the sintering temperature of analyzed resins is well above 1000°C”, w którym jest oczywiste, że to część ceramiczna spieka się w tak wysokich temperaturach, a żywica została wcześniej usunięta w dużo niższej temperaturze.
2. Nie do końca jasny jest indywidualny wkład i zakres prac własnych doktoranta w aplikacjach będących przedmiotem prac magisterskich. Moim zdaniem nie jest dobrym pomysłem zamieszczanie w rozprawie doktorskiej rysunków z prac magisterskich (oczywiście prawidłowo powołano się na te prace). Uważam, że jest to dopuszczalne, ale lepszym rozwiązaniem byłyby własne rysunki, tym bardziej że powtórzono słabą czytelność i błędy na osiach tych rysunków.
3. Nieco dyskusyjna jest struktura rozprawy, bardziej typowa dla monografii habilitacyjnych niż rozpraw doktorskich. Między innymi, bardzo dokładne opisy metodyki wytwarzania i sposobu przeprowadzania badań nie są na ogół umieszczane w odrębnych podrozdziałach, co utrudnia lekturę rozprawy w przypadku zainteresowania fragmentem, a nie całością przedstawionej tematyki.
4. Str.69 Słabe jest wyjaśnienie rysunku 4.2 (nie widać gdzie są „smaller dark lines”).
5. Str. 102 Porównanie rys. 4.26, 4.27 i 4.29 z tekstem zawierającym ich interpretację, wskazuje na pewne niedokładności i przesunięcie pików w temperaturach 350, 425 i 475°C. Wykres DSC powinien być w bezpośrednim sąsiedztwie wykresu TG lub DTG, żeby stwierdzić czy efektem termicznym towarzyszą zmiany masy, czy nie. Najlepszym rozwiązaniem byłoby wskazanie charakterystycznych temperatur na rysunkach.
6. Str. 118 Uciążliwe technologicznie wydaje się szybkie starzenie się kompozycji stanowiącej mieszaninę żywicy z proszkiem ceramicznym (związane z sedymentacją

cząstek ceramicznych) i konieczność regularnej rehomogenizacji. Nieco zmniejsza to wartość osiągnięcia w postaci opracowania nowej kompozycji ceramiczno-polimerowej o bardzo dobrych parametrach po obróbce termicznej. Autor zaznacza jednak, że optymalizacja składu dla poprawy tej właściwości przez dobór odpowiednich stabilizatorów nie był przedmiotem zainteresowania w pracy. Z pewnością warto zrealizować ten cel w ramach przyszłych prac.

7. Str. 121 Podpis pod rys. 4.35 “The obtained TGA graph showing residual ceramic mass content of commercial and the developed resin” nie jest właściwy. Rysunek ilustruje zmiany względnej masy kompozycji ceramiczno-polimerowych w trakcie ogrzewania od 100 do 600°C i dopiero efekt w końcowej temperaturze wyznacza masę materiału ceramicznego pozostającej po wypaleniu części organicznej w niższych temperaturach (residual ceramic mass). Podpis powinien raczej brzmieć “The obtained TGA graph showing relative mass content of commercial and the developed resin during heating in the temperature range 100-600°C”
8. Wątpliwości budzi czy laserowe grawerowanie w celu poprawy adhezji nie jest zbyt drogą i pracochłonną metodą, dodatkowo ograniczającą swobodę w projektowaniu układu elektronicznego i dołączaniu elementów.
9. Str.161 Table 5.2 Opisy kolumn w tabeli 5.2 są niejasne przez użycie zbyt podobnych określeń „Area” - „before modification” i „after modification” oraz „Fluid” – „modified” i „unmodified”, chyba lepiej byłoby dla rozróżnienia poszczególnych obszarów zastosować określenia z tekstu „inside discharge area” i „outside discharge area”.
10. Tekst zawiera niewielką liczbę drobnych pomyłek, literówek i błędów gramatycznych:
 - Str. 23 Jest “fast iron conductive ceramics”, powinno być “fast ion conductive ceramics”
 - Str. 24 Jest “which makes is ideal for sensors”, powinno być “which makes it ideal for sensors”
 - Str 48 Jest “is typically int the range”, powinno być “is typically in the range”
 - Str. 35, 66, 126, 175, 181 Jest „trough” zamiast „through”
 - Str.35 Jest „a significant laser powder “, powinno być „a significant laser power “,
 - Str. 100 Jest “temperature rage”, powinno być “temperature range”
 - Str. 103 Jest “part should slightly translucent”, powinno być “part should be slightly translucent”
 - Str. 115 Jest “is to high” zamiast “is too high”
 - Str.118 Prawdopodobnie zamiast “amorphous Si”, powinno być “amorphous SiO₂”
 - Str.120 Jest “a further research shown”, powinno być “a further research has shown”
 - Str. 121 Jest “provides and advantage for”, powinno być “provides an advantage for”
 - Str.126 Jest “in for of a chess rook”, powinno być “in form of a chess rook”
 - Str. 150 Jest „in order to asses”, powinno być „in order to assess”
 - Str.150 Jest „the devices contains”, powinno być „the device contains”
 - Str. 150 Jest „the test described in this work were performed”, powinno być „the test described in this work was performed”
 - Str. 151 Jest „it can considered as an appropriate material”, powinno być „it can be considered as an appropriate material”
 - Str. 153 Jest „to bonds with”, powinno być „to bond with”
 - Fig.5.9, Fig.5.18, Fig.5.22, Fig.5.27 Nieprawidłowo zastosowano przecinek zamiast kropki jako znak dziesiętny na wykresach z osiami w j. angielskim
 - Str.163 Jest „should be provide”, powinno być „should be provided”
 - Str. 168 Jest “the optical properties of translucent polymers is analysed”, powinno być “the optical properties of translucent polymers are analysed”

- Str.169 Jest "describe in the section 5.1", powinno być "described in the section 5.1"
- Str.171 Jest "the the SSA", powinno być "the SSA"
- Str.181 Jest „the quality the of surface”, powinno być „the quality of the surface”
- Str.187 Jest „befits”, powinno być „benefits”
- Str. 185 Jest „was solder”, powinno być „was soldered”

Podsumowanie oceny rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca spełnia doskonale wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna. Praca wnosi wartościowy wkład w rozwój dziedziny, której dotyczy – metod wytwarzania przyrostowego (druku 3D). W rozprawie Autor przedstawił aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie i wykazał dużą ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej, w której ubiega się o stopień doktora.

Mocną stroną rozprawy jest bardzo jasne wskazywanie jakie są główne cele pracy oraz dodatkowe cele związane z rozwiązaniem pojawiających się trudności technologicznych. Wyniki badań są przedstawiane i dyskutowane w obiektywny sposób z podawaniem zarówno rozwiązań zakończonych pozytywnym rezultatem, jak i problemów, których nie udało się pokonać. Świadczy to o umiejętności doktoranta postawieniu problemu naukowego i jego rozwiązywania. Należy uznać, że założony cel pracy został zrealizowany, a zaprezentowane w rozprawie wyniki prac eksperymentalnych wraz z pogłębioną dyskusją należy uznać za rozwiązanie podjętego problemu naukowego. Przedstawiona rozprawa w pełni dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez mgr Witolda Nawrota.

Autor wykazał umiejętność wykorzystania szerokiego wachlarza nowoczesnych metod do charakterystyki właściwości badanych materiałów i struktur, takich jak: mikroskopia optyczna, mikroskopia skaningowa, laserowa mikroskopia skaningowa, termograwimetria, różnicowa kalorymetria skaningowa, transmisyjne obrazowanie rentgenowskie, badanie powierzchni właściwej metodą BET, badanie porowatości metodą piknometrii helowej, badanie lepkości metodą wiskozymetrii, badanie zespolonej przenikalności dielektrycznej metodą „split post dielectric resonator”, spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera, spektroskopia UV-Vis, fotokalorymetria, testy na odrywanie, testy na rozerwanie.

Wysoko należy ocenić sposób prezentacji i interpretacji uzyskanych wyników badań oraz formułowania wniosków, a także poziom edytorski rozprawy. Rozprawa jest napisana bardzo dobrym stylem, w sposób szczegółowy, logiczny i konsekwentny przedstawiający metodykę badań, wyniki realizowanych prac i ich dyskusję.

Innowacyjnym aspektem i głównym osiągnięciem pracy opisanej w rozprawie doktorskiej jest opracowanie nowych materiałów i nowych metod do wytwarzania skomplikowanych elementów przy użyciu techniki stereolitografii, które są dostosowane do niedrogich urządzeń SL oraz ich pomyślnie zastosowanie w testowych przestrzennych strukturach, obudowach i mikrosystemach. W szczególności na podkreślenie zasługują następujące osiągnięcia:

- opracowanie składu autorskiej kompozycji ceramiczno-polimerowej dostosowanej do techniki stereolitografii (druku 3D) i optymalizację warunków jej procesu obróbki termicznej zapewniającej bardzo wysoką względną gęstość elementów ceramicznych po wypaleniu i właściwości porównywalne do elementów wykonanych technologią LTCC
- opracowanie skutecznej, choć wymagającej dalszych ulepszeń, metody selektywnego stosowania plazmy zapewniającej efektywne połączenie przezroczystego polimeru PDMS z ceramiką LTCC bez uszkodzania wrażliwych biomateriałów.
- zastosowanie połączenia ceramicznych mikrosystemów z materiałami polimerowymi w zaawansowanych obudowach, bioczipach i optoelektronicznych czujnikach, co przynosi efekt synergii i umożliwia integrację wewnątrz struktur materiałów wrażliwych

na temperaturę, jak warstwy biologiczne czy elektroniczne elementy czynne, co stanowi trudność w ceramicznych mikrosystemach

- opracowanie metodyki wytwarzania zaawansowanych przestrzenne struktur ceramicznych, polimerowych i ceramiczno-polimerowych przy użyciu relatywnie taniej, prostej i elastycznej na etapie projektowania procedury, która nie wymaga wdrażania bardzo skomplikowanego i wieloetapowego procesu
- popularyzacja opracowanych metod wytwarzania przyrostowego wśród specjalistów z różnych dziedzin (elektronicy, biolodzy, chemicy, farmaceuci) dzięki jej uproszczeniu i digitalizacji części etapów oraz ułatwienie współpracy w interdyscyplinarnych zespołach.

Dodatkową cenną wartością pracy doktorskiej jest jej międzynarodowy charakter, który umożliwił korzystanie z wielu zaawansowanych urządzeń i metod analitycznych oraz z doświadczenia i wsparcia naukowego szerokiego zespołu specjalistów z obu krajów uczestniczących w projekcie.

Stwierdzam, że praca doktorska, której autorem jest mgr inż. Witold Nawrot, zatytułowana „Application of Additive Manufacturing in Ceramic-Polymer Microsystems” („Zastosowanie wytwarzania przyrostowego w mikrosystemach ceramiczno-polimerowych”) spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. W mojej opinii, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wyraźnie wykracza poza poziom przeciętny, prezentując wysoką wartość naukową i potencjał aplikacyjny, w związku z czym wnioskuję o jej wyróżnienie.

D. Swęgrzek