

Witold Nawrot
imię i nazwisko kandydata

**STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
NA TEMAT:
„Zastosowanie wytwarzania przyrostowego
w mikrosystemach polimerowo-ceramicznych”**

Celem niniejszej rozprawy jest rozszerzenie możliwości strukturyzacji mikrosystemów ceramicznych oraz zwiększenie ich dostępności poprzez wprowadzenie niedrogich metod wytwarzania przyrostowego i łączenie z polimerami.

Jednym z podstawowych zadań była ocena możliwości wytwarzania przyrostowego mikrosystemów ceramicznych i ceramiczno-polimerowych. Pierwsza część pracy stanowi szczegółowe wprowadzenie do tematu. W rozdziale 2 opisano referencyjną technologię wielowarstwowej ceramiki współwypalanej niskotemperaturowo (ang. Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC). Przedstawiono jej mocne i słabe strony oraz wskazano w jaki sposób metody przyrostowe może poszerzyć możliwości wytwórcze tej technologii, a w dłuższej perspektywie stać się alternatywą dla dotychczasowych procesów. Rozdział 3 zawiera krótkie wprowadzenie do wytwarzania przyrostowego, w tym ich klasyfikację, krótki przegląd aktualnych zastosowań w technologii mikrosystemów, metody obróbki materiałów ceramicznych, mocne i słabe strony popularnych metod, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości przetwarzania materiałów ceramicznych. Jako obecnie najbardziej odpowiednią do wytwarzania mikrosystemów ceramicznych wskazano stereolitografię (SL). Szczegółowo opisano wybrany proces wytwórczy, zachodzące w jego trakcie zjawiska, typowe problemy oraz obecne możliwości opisane w literaturze. Przedstawiono także stanowisko laboratoryjne wykorzystane w niniejszej pracy.

W części drugiej rozprawy opisano oryginalne badania nad zastosowaniem wytwarzania przyrostowego w mikrosystemach ceramicznych i ceramiczno-polimerowych. Rozdział 4 koncentrował się wokół możliwości mikroobróbki materiałów ceramicznych metodą stereolitografii. Określono dolny próg strukturalizacji, głównie dla kanałów mikroprzepływowych i słupków o wysokim współczynniku kształtu. Zaproponowano kilka nowych procesów, pozwalających na zwiększenie możliwości procesu i otrzymanie mniejszych detali:

- wytwarzanie kanałów o profilu otwartym,
- hybrydowa metoda strukturyzacji przyrostowo-ubytkowej,
- łączenie elementów przy użyciu szkliwa,
- łączenie elementów przy użyciu ceramicznej żywicy światłoczułej,
- zastosowanie warstwy poświęcanej przy wytwarzaniu jednolitych elementów.

Oceniono także wpływ parametrów procesu na możliwości strukturalizacji i właściwości materiałów dostępnych komercyjnie dla niedrogich urządzeń metodą stereolitografii:

- wpływ orientacji druku na rozdzielczość, odwzorowanie kształtów i strukturę wewnętrzną
- wpływ pozycji na platformie urządzenia na wierność kształtu,
- wpływ szczytowej temperatury wypalania na porowatość i właściwości dielektryczne,
- wpływ fazy szklistej na porowatość i właściwości dielektryczne,

Ponadto, porowatość otrzymanych struktur została dokładnie zbadana. Przeanalizowano ilość porów otwartych i zamkniętych w opracowanych strukturach. Co istotne, wykazano, że stereolitografia ceramiczna pozwala na wykonanie skomplikowanych kształtów przestrzennych, nieosiągalnych w obecnie szeroko stosowanej technologii wielowarstwowej LTCC zawierające:

- rozległe samonośne kształty,
- cienkie warstwy o grubości poniżej 50 μm ,
- małe odizolowane przekroje,
- wysoki współczynnik proporcji.

Pomimo zaawansowanych możliwości strukturyzacji przestrzennej, wykazano, że właściwości komercyjnych materiałów, kompatybilnych z niedrogimi urządzeniami stereolitograficznymi, są niezadowalające. W celu osiągnięcia parametrów spełniających oczekiwaniom zaawansowanej technologii mikrosystemów ceramicznych, zwłaszcza w zakresie porowatości i wynikających z niej właściwości dielektrycznych, opracowano oryginalną kompozycję światłoczułą, opartą na materiale kompozytowym ceramiczno-szklanym, jakim jest LTCC. Materiał został zaprojektowany tak, aby był kompatybilny z niedrogimi urządzeniami SL i zapewniał wysoką wydajność po wypaleniu. Dlatego, jego skład musiał być sprostać szeregowi wymagań, które tworzą wąskie okno procesowe:

- wysoka zawartość cząstek ceramicznych (co najmniej 60%),
- odpowiednia reologia (lepkość poniżej 7 Pa·s),
- precyzyjnie dobrana czułość na promieniowanie z zakresu UV,
- wystarczająca wytrzymałość mechaniczna w stanie surowym.

Jedynie odpowiednio dobrana kompozycja pozwala na uzyskanie złożonych struktur przestrzennych, zapewniających po wypaleniu cechy materiałowe porównywalne z referencyjną technologią wielowarstwową LTCC. Wykazano, że taki materiał został z powodzeniem opracowany. Zademonstrowano przykładowe geometrie nieosiągalne w obecnie stosowanej technologii LTCC. Opracowano również kompatybilne procesy wypalania, w celu uzyskania pełnych właściwości materiału ceramicznego. Uzyskano bardzo wysoką gęstość względną bez odkształceń i pęknięć. Wyprodukowane struktury miały bardzo gładką powierzchnię i parametry dielektryczne odpowiadające referencyjnej technologii wielowarstwowej LTCC. Jest to uważane za główne osiągnięcie niniejszej rozprawy. Wyniki porównano z aktualnymi doniesieniami literaturowymi, opisującymi podobne rozwiązania, które zostały opracowane równoległe do oryginalnych badań przedstawionych w rozprawie. Podkreśla to aktualność prowadzonych badań.

W rozdziale 5 opisano autorskie metody mające na celu rozszerzenie możliwości mikrosystemów ceramicznych poprzez łączenie z materiałami polimerowymi. Takie podejście może zapewnić synergię i pozwolić na wytwarzanie zaawansowanych obudów optoelektronicznych i czujników optycznych. Ponadto, opracowane procesy umożliwiają integrację materiałów wrażliwych na temperaturę (takich jak warstwy biologiczne czy aktywne komponenty elektroniczne) wewnątrz struktur, co jest trudne do osiągnięcia w mikrosystemach ceramicznych. Opisano dwie oryginalne metody:

- selektywne łączenie plazmowe z PDMS,
- bezpośredni druk 3D materiałów polimerowych na zmodyfikowanych podłożach ceramicznych.

Obie metody zostały dokładnie przeanalizowane i zoptymalizowane poprzez szereg analiz, które wykazały, że:

- łączenie z polimerami pozwala na bezpieczną integrację materiałów wrażliwych na temperaturę,
- materiały polimerowe mogą zapewnić wysoką przezroczystość optyczną,
- struktury polimerowe mogą być bezpośrednio drukowane na podłożach ceramicznych,
- technologia układów ceramiczno-polimerowych może zapewnić trwałe połączenie.

Przestawiono również przykłady zastosowań, szczególnie w mikroprzepływowych czujnikach chemicznych i biologicznych z detekcją optyczną. Wykonano układ fluorymetryczny, w celu zademonstrowania potencjału opracowanych metod. Nowatorskie podejścia i potencjalne korzyści z połączenia możliwości struktur ceramicznych i polimerowych są uważane za ważne osiągnięcie niniejszej rozprawy.

Co najważniejsze, opracowane metody i procesy pozwalają na uzyskiwanie zaawansowanych przestrzennie struktur zarówno w strukturach ceramicznych jak i polimerowych oraz umożliwiają ich

trwałe łączenie, w celu uzyskania swobody projektowania i uproszczenia wytwarzania. Wszystkie opisane procesy bazują na niedrogich i popularnie stosowanych urządzeniach i materiałach. Jedynym wyjątkiem jest autorska kompozycja światłoczuła, opracowana w ramach tej rozprawy. W związku z tym planowany jest dalszy jej rozwój, mający na celu podniesienie poziomu gotowości technologicznej i uzyskania produktu, który mógłby zostać wprowadzony na rynek.

Ze względu na dostępność narzędzi i materiałów użytych w niniejszej rozprawie, możliwe jest wdrożenie opracowywanych procesów przez osoby nie będące specjalistami w technologii. W rezultacie, eksperci z innych dziedzin, np. chemicy, farmaceuci, biolodzy mogą korzystać z opracowanych metod druku 3D jako narzędzia w ich własnym środowisku pracy. Szczególnie obiecujące w tym względzie jest bezpośrednie drukowanie polimeru na ceramice. Uniwersalne podłoża ceramiczne z układem elektrod mogą być dostępne na rynku i umożliwić drukowanie na nich układów mikroprzepływowych według własnego projektu. Pozwoliłoby to na skrócenie czasu pomiędzy pomysłem a jego realizacją do zaledwie pojedynczych godzin i umożliwiło szybkie eksperymentowanie. Mogłoby również zmienić sposób współpracy zespołów, umożliwiając przesyłanie plików cyfrowych zamiast delikatnych próbek. Dla przykładu, podczas realizacji niniejszej rozprawy, identyczne urządzenia były używane zarówno na Politechnice Wrocławskiej, jak i w TU Ilmenau i pozwoliły na wytwarzanie struktury według jednego projektu z powtarzalnymi wynikami, potwierdzając poprawność przedstawionej koncepcji.



.....
podpis doktoranta

