

Bielsko-Biała, 29.03.2026 r.

Dr hab. inż. Izabella Rajzer, prof. UBB
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
Uniwersytet Bielsko-Bialski

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Many Nabavian Kalat
pt.: „**Thermomechanical Properties of Additively Manufactured Shape Memory
Epoxy for Advanced Shape-Morphing Applications**”
zrealizowanej pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Kowalewskiego oraz
Prof. Andrés Díaz Lantada

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie powołania przez Radę Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „**Thermomechanical Properties of Additively Manufactured Shape Memory Epoxy for Advanced Shape-Morphing Applications**” dotyczy badania właściwości termomechanicznych polimerów z pamięcią kształtu (SMP) – termoplastycznego poliuretanu (PU-SMP) oraz żywicy epoksydowej (SMEp) – w kontekście ich zastosowania w druku 4D oraz opracowania innowacyjnej metodologii wytwarzania struktur bezmontażowych, zdolnych do precyzyjnej i zaprogramowanej transformacji geometrii pod wpływem zlokalizowanego bodźca termicznego.

Druk 4D stanowi rewolucyjne rozszerzenie technologii wytwarzania przyrostowego, wprowadzając czas jako czwarty wymiar, co umożliwia statycznym dotąd strukturom 3D dynamiczną zmianę kształtu, właściwości lub funkcji pod wpływem zaprogramowanych bodźców zewnętrznych. W ostatnich latach dziedzina ta odnotowała gwałtowny wzrost, ewoluując od prostych eksperymentalnych demonstracji działania materiałów z pamięcią kształtu do zaawansowanych systemów shape-morphing, które znajdują zastosowanie w inteligentnych komponentach lotniczych, miękkiej robotyce czy inżynierii tkankowej. Centralną rolę w tych osiągnięciach odgrywa rozwój inteligentnych materiałów polimerowych, wśród których szczególnie wyróżniają się poliuretany oraz żywice epoksydowe. Poliuretany są szeroko stosowane ze względu na swoją elastyczność oraz segmentową budowę (segmenty twarde i miękkie), która umożliwia precyzyjne dostrojenie temperatury przejścia i właściwości efektu pamięci kształtu; w zależności od składu mogą wykazywać zarówno wysoką biostabilność, jak i kontrolowaną biodegradowalność. Z kolei żywice epoksydowe charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną i stabilnością termiczną, a w odpowiednio zaprojektowanych systemach mogą tworzyć dynamiczne, odwracalne wiązania kowalencyjne,

co otwiera drogę do materiałów samonaprawialnych i potencjalnie podlegających recyklingowi. Wyzwaniem w rozwoju tej dziedziny pozostaje nie tylko dobór odpowiednich materiałów, ale przede wszystkim precyzyjna charakterystyka ich właściwości termomechanicznych oraz opracowanie strategii projektowych pozwalających na uzyskanie złożonych transformacji geometrycznych.

Niniejsza praca doktorska Pani mgr inż. Many Nabavian Kalat, skupiająca się na właściwościach termomechanicznych żywic epoksydowych i poliuretanów, wpisuje się w nurt najnowocześniejszych badań nad funkcjonalnymi strukturami, które mogą autonomicznie adaptować się do dynamicznych warunków fizjologicznych lub środowiskowych. Opracowanie strategii tworzenia struktur bezmontażowych (assembly-free) oraz precyzyjna kontrola anizotropii i rozszerzalności cieplnej w druku SLA nadają rozprawie **nowatorski charakter o dużym znaczeniu praktycznym**.

1. Strona edytorska rozprawy

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Many Nabavian Kalat liczy 195 stron, zawiera 83 rysunki i 17 tabel. Praca jest ilustrowana licznymi schematami, mikrofotografiami oraz wykresami z badań termomechanicznych, co ułatwia interpretację prezentowanych wyników. Rozprawa została przygotowana w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów. Rozdział 1 stanowi merytoryczne wprowadzenie do technologii druku 4D, obejmujące zasady działania polimerów z pamięcią kształtu oraz ich zastosowania w zaawansowanej inżynierii i medycynie; zawiera również motywację badawczą, cele pracy oraz opis struktury rozprawy. Rozdział 2 ma charakter przeglądu literatury i dotyczy zarówno materiałów SMP, jak i technologii wytwarzania przyrostowego, wskazując aktualne wyzwania w obszarze druku 4D oraz identyfikując luki badawcze uzasadniające podjęte badania. W rozdziale 3 Doktorantka przedstawiła materiały oraz procesy ich wytwarzania (obejmujące m.in. wytłaczanie filamentu PU-SMP, druk FDM oraz precyzyjny druk SLA żywic epoksydowych), a także zastosowane metody badań; zaprezentowano również kompletny protokół eksperymentalny służący walidacji właściwości termomechanicznych oraz testowaniu opracowanych struktur. Kolejne trzy rozdziały poświęcone są prezentacji i analizie wyników badań przeprowadzonych w ramach rozprawy. Rozdział 7 zawiera podsumowanie najważniejszych osiągnięć pracy, łącząc wyniki badań materiałowych z praktycznymi aspektami tworzenia struktur typu shape-morphing. Mgr inż. Mana Nabavian Kalat formułuje w nim wnioski końcowe oraz podkreśla znaczenie opracowanej metodologii projektowania dla rozwoju nowoczesnej inżynierii i robotyki. Doktorantka oparła pracę na bibliografii liczącej 164 pozycje, obejmującej kluczowe i aktualne doniesienia naukowe z zakresu polimerów z pamięcią kształtu (SMP) oraz technik wytwarzania przyrostowego.

Mimo wysokiej wartości merytorycznej rozprawy, Doktorantka nie ustrzegła się drobnych błędów edytorskich. Do najważniejszych z nich należą:

1. Błędy w nazewnictwie materiałów: W kilku miejscach opisu procedur badawczych Doktorantka błędnie posługuje się akronimem żywicy epoksydowej (SMEp) w kontekście badań nad poliuretanem (PU-SMP). Przykładem jest strona 46 (wers 2) gdzie mowa

- o wygrzewaniu próbki SMEp w 110 °C oraz strona 82 (wers 9) dotycząca cyklicznego rozciągania próbek.
2. Drobne błędy w składzie tekstu, takie jak brak wielkiej litery na początku zdania (str. 13, wers 29: „. the modulus...”) czy niepotrzebne dzielenie wyrazów (str. 15, wers 17: „thermoreponsive”). Ponadto na stronie 91 (wers 14) występuje powtórzenie całego fragmentu zdania („...improving their ability to stretch and slide rather than fracture and improving their ability to stretch and slide rather than fracture...”).
 3. Błąd związany z nieuzasadnionym stosowaniem symbolu „@” w opisach parametrów temperaturowych (np. na str. 43 wers 1 oraz na str. 15 Rys. 7)
 4. Błędy w odwołaniach: na stronie 155 (wers 25) występuje błędne odesłanie do rysunków (zamiast do 74 b, c, d jest zapis 74 a, b, c).

Powyższe uwagi mają charakter techniczny i nie podważają wartości naukowej przedstawionych badań.

Ocena merytoryczna pracy

Cel pracy został szczegółowo przedstawiony w Rozdziale 1, podrozdziale 1.2 zatytułowanym „Thesis Motivation and Objectives”. Motywacją do podjęcia badań była analiza zachowania termomechanicznego polimerów z pamięcią kształtu (SMP) oraz wykorzystanie ich zdolności do kontrolowanej zmiany geometrii poprzez innowacyjne projektowanie i precyzyjne wytwarzanie przyrostowe. Celem pracy było opracowanie metodologii tworzenia złożonych, samodostosowujących się struktur reagujących na bodźce środowiskowe, ze szczególnym uwzględnieniem monolitycznych, bezmontażowych urządzeń typu shape-morphing. Doktorantka sformułowała trzy główne cele szczegółowe obejmujące następujące prace: (1) Wstępne badanie właściwości termomechanicznych oraz przydatności do druku FDM termoplastycznego poliuretanu z pamięcią kształtu (PU-SMP). (2) Kompleksową analizę żywicy epoksydowej (SMEp) wytwarzanej metodą SLA, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu orientacji druku i anizotropii na mikrostrukturę, stabilność wymiarową oraz parametry pamięci kształtu. (3) Projektowanie, wytwarzanie i programowanie monolitycznych prototypów 4D z żywicy SMEp, poprzez integrację przegubów podatnych i łańcuchów kinematycznych w strukturach jednomateriałowych, walidację zlokalizowanej aktywacji termicznej przy użyciu termowizji oraz ilościową ocenę odkształceń i odzysku kształtu w różnych konfiguracjach geometrycznych.

Cele rozprawy są sformułowane jasno, logicznie i pozwalają czytelnikowi dobrze prześledzić kolejne etapy badań. Mają jednak przede wszystkim charakter zadaniowy i opisowy, koncentrując się na „badaniu” i „projektowaniu”, zamiast na weryfikacji precyzyjnie postawionych hipotez badawczych. W ich obecnej formie nie wybrzmiewa w pełni oryginalny wkład naukowy Autorki, mimo że jest on widoczny w wynikach pracy.

Pani mgr inż. Mana Nabavian Kalat w rozdziale 2 rozprawy doktorskiej przedstawiła kompleksowy przegląd literatury dotyczący polimerów z pamięcią kształtu, szczegółowo omawia w nim mechanizmy działania SMP, porównując je z konwencjonalnymi polimerami, oraz opisuje metody ilościowego określania parametrów pamięci kształtu w cyklach termomechanicznych. Kolejne podrozdziały poświęcone są charakterystyce wytwarzania przyrostowego, ze szczególnym uwzględnieniem technik odpowiednich dla polimerów SMP takich jak FDM, SLA, DLP. Doktorantka przybliżyła również koncepcję druku 4D jako technologii umożliwiającej tworzenie dynamicznych struktur zdolnych do programowalnej transformacji kształtu w czasie. Mgr inż. Mana Nabavian Kalat trafnie identyfikuje wyzwania wynikające z niedostatecznej charakterystyki termomechanicznej żywic termoutwardzalnych stosowanych w technologii SLA. Słusznie zauważa, że w odróżnieniu od dobrze opisanych materiałów FDM, parametry pamięci kształtu dla materiałów SLA nie zostały dotychczas kompleksowo i ilościowo zbadane, co przekłada się na ograniczoną przewidywalność działania struktur 4D. Na uznanie zasługuje również wskazanie niedoszacowanego wpływu anizotropii – często pomijanej w przypadku SLA – pomimo jej istotnego znaczenia dla właściwości mechanicznych oraz powtarzalności odpowiedzi układów. Doktorantka zwraca ponadto uwagę na niewystarczająco rozpoznany wpływ kierunkowo zależnej rozszerzalności cieplnej, która w warunkach aktywacji termicznej może prowadzić do błędów wymiarowych i niepożądanych deformacji.

Po zapoznaniu się z częścią teoretyczną rozprawy można stwierdzić, że Pani mgr inż. Mana Nabavian Kalat wykazuje dobre przygotowanie teoretyczne w zakresie omawianej problematyki. Przegląd literatury został opracowany w sposób przejrzysty i świadczy o właściwym rozumieniu kluczowych zagadnień oraz aktualnych kierunków badań.

Część doświadczalna pracy została przedstawiona w trzech rozdziałach. W rozdziale 4 skoncentrowano się na poliuretanach z pamięcią kształtu (PU-SMP), analizując ich właściwości mechaniczne, termiczne oraz mikrostrukturę, a także opracowując procedury oceny utrwalenia i odzysku kształtu. Doktorantka przeprowadziła kompleksową charakterystykę termomechaniczną z wykorzystaniem metod DSC, TGA, TMA oraz testów wytrzymałościowych. Na szczególne wyróżnienie zasługują badania nad wpływem historii termicznej na temperaturę zeszklenia (T_g) poliuretanu oraz wykazanie możliwości jego programowania na zimno (cold programming). Istotnym wynikiem jest również wykazana na podstawie obserwacji SEM tendencja do zamykania się mikropęknięć powstających w materiale podczas programowania na zimno w trakcie termicznego odzysku kształtu. Stanowi to ważny argument na rzecz trwałości i możliwości wielokrotnego użytkowania takich struktur. Napotkane bariery techniczne w metodzie FDM, przejawiające się niską rozdzielczością oraz problemami z podawaniem filamentu PU-SMP jak również brakiem odpowiedniej ilości materiału do badań, stały się dla Mgr inż. Many Nabavian Kalat powodem do zmiany technologii wytwarzania na SLA i zastosowania żywicy epoksydowej SMEp. Kolejny rozdział poświęcono analizie właściwości żywicy epoksydowej SMEp, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu orientacji druku na właściwości materiałowe, stabilność wymiarową oraz zachowanie anizotropowe. Kluczowym wkładem naukowym pracy jest systematyczna analiza anizotropii w wydrukach SLA. Doktorantka wykazała, że orientacja krawędziowa (SMEp1) zapewnia mocniejsze połączenie między kolejnymi warstwami

materiału oraz mniejszą podatność na wchłanianie wody w porównaniu do orientacji płaskiej (SMEp2). Jednocześnie próbki drukowane w tej orientacji charakteryzują się wyższą wytrzymałością na rozciąganie, niższą rozszerzalnością cieplną oraz bardziej efektywnym odzyskiwaniem kształtu. Z kolei próbki drukowane w orientacji płaskiej wykazują większe wydłużenie. Wykazano również, że dzięki niskiej nasiąkliwości materiału możliwa jest realizacja cykli 4D poprzez bezpośrednie zanurzenie w gorącej i zimnej wodzie, co znacząco przyspiesza reakcję układu w porównaniu do konwekcyjnego ogrzewania powietrzem. Na uwagę zasługuje także uwzględnienie niekontrolowanej rozszerzalności cieplnej jako integralnego składnika całkowitego odkształcenia, co bezpośrednio przyczyniło się do zwiększenia precyzji projektowanych prototypów. W rozdziale 6 Doktorantka zaprezentowała opracowanie monolitycznych struktur bezmontażowych (assembly-free), które dzięki zastosowaniu przegubów podatnych (compliant joints) i sprężyn skrętnych realizują zaprogramowane funkcje mechaniczne. Istotnym osiągnięciem jest nie tylko wykonanie samych prototypów, lecz także opracowanie spójnej metodologii projektowania, w której rzeczywiste właściwości materiałowe, w tym spójność międzywarstwowa i zmiany wymiarowe wynikające z sieciowania polimeru, determinują docelowy kształt i parametry geometryczne struktur. Wykorzystanie zlokalizowanej aktywacji cieplnej mikro-siłowników, potwierdzonej badaniami termowizyjnymi, umożliwiło skrócenie czasu reakcji systemu, co należy uznać za istotne osiągnięcie inżynierskie.

Po zapoznaniu się z rozprawą nasuwają się następujące uwagi i pytania:

1. W rozdziale dotyczącym analizy zmian zachodzących w mikrostrukturze próbek PU-SMP pod wpływem wielokrotnego rozciągania (str. 92, Rys. 51) Doktorantka prezentuje obrazy SEM przy znacznie różniących się powiększeniach (od $\times 200$ do $\times 950$). Dla zapewnienia pełnej porównywalności zmian powierzchniowych zasadne byłoby zestawienie zdjęć wykonanych przy zbliżonych parametrach powiększenia. Nie przedstawiono również mikrofotografii SEM mikrostruktury po 5000 cykli, mimo że moment ten wskazywany jest jako początek wyraźnej degradacji mechanicznej materiału. Nie jest także jednoznacznie określone, czy prezentowane wyniki mikrostrukturalne pochodzą z tej samej czy z różnych próbek, co może mieć znaczenie dla oceny ich reprezentatywności. Ponadto analiza przełomów próbek mogłaby dostarczyć istotnych informacji na temat inicjacji uszkodzeń wewnętrznych, które często poprzedzają obserwowane defekty powierzchniowe.
2. W badaniach FTIR zastosowano jedynie 8 skanów na próbkę, co stanowi stosunkowo niewielką liczbę w kontekście analizy materiałów polimerowych. Może to skutkować podwyższonym poziomem szumu oraz ograniczoną możliwością precyzyjnego monitorowania słabszych pasm absorpcyjnych. W praktyce standardowo stosuje się większą liczbę skanów (np. 32), co pozwala uzyskać korzystniejszy stosunek sygnału do szumu oraz wyższą dokładność analizy, szczególnie istotną przy ocenie subtelných zmian chemicznych zachodzących podczas procesu sieciowania. Ponadto w rozdziale 5.4 nie przedstawiono widma FTIR wyjściowej żywicy epoksydowej przed procesem druku. Utrudnia to bezpośrednio, ilościowe potwierdzenie stopnia zaniku sygnałów charakterystycznych dla grup epoksydowych oraz obiektywną ocenę stopnia przereagowania materiału.

3. W części poświęconej technologii FDM brakuje szczegółowej analizy morfologicznej filamentu wytwarzanego przez Doktorantkę z recyklingu próbek PU-SMP. Biorąc pod uwagę zgłaszane problemy z niespójną średnicą oraz utrudnionym podawaniem materiału, zasadne byłoby uzupełnienie pracy o badania mikroskopowe (np. SEM) powierzchni oraz przekroju poprzecznego filamentu. Taka analiza pozwoliłaby ocenić, czy w jego strukturze występują wewnętrzne lub powierzchniowe nieciągłości, takie jak pory czy pustki, mogące wpływać na stabilność procesu ekstruzji oraz ciągłość druku. Dodatkowo Doktorantka wskazuje, że filament uzyskał czerwone zabarwienie w wyniku obecności pozostałości pigmentu w ekstruderze. W pracy nie podjęto jednak dyskusji dotyczącej potencjalnej aglomeracji cząstek pigmentu, która w przypadku materiałów pochodzących z recyklingu jest zjawiskiem stosunkowo częstym i może mieć istotny wpływ na właściwości materiału. Niejednorodne rozmieszczenie pigmentu może prowadzić do zaburzeń przepływu materiału w dyszy oraz zmian właściwości reologicznych polimeru. Zjawiska te mogą potencjalnie wpływać na obserwowaną w pracy obniżoną adhezję międzywarstwową oraz występowanie delaminacji (Rys. 56), a w konsekwencji na powtarzalność procesu wytwarzania oraz parametry odzysku kształtu struktur 4D.
4. W rozdziale 4.8 (str. 103–104) Doktorantka opisuje zjawisko „samogojenia” (self-healing) zdelaminowanych warstw w prototypach PU-SMP wytwarzanych metodą FDM. Wnioskowanie o przywróceniu integralności strukturalnej oparto jednak wyłącznie na analizie wizualnej dokumentacji fotograficznej (Rys. 56), na której obserwuje się zanik szczelin delaminacyjnych po cyklu termicznym. Z punktu widzenia inżynierii materiałowej istotne jest określenie, czy powstałe w ten sposób połączenie charakteryzuje się mierzalną wytrzymałością mechaniczną, czy też stanowi jedynie efekt powierzchniowego zamknięcia szczelin, wynikający z relaksacji naprężeń i uplastycznienia materiału. W rozprawie nie przedstawiono wyników badań mechanicznych (np. prób rozciągania lub testów adhezji) dla „zagojonych” próbek, które pozwoliłyby na ilościową ocenę stopnia odtworzenia wiązań międzywarstwowych. Uzupełnienie pracy o tego typu analizę znacząco wzmocniłoby podstawy wnioskowania oraz pozwoliłoby na bardziej jednoznaczną walidację tezy dotyczącej zdolności materiału do regeneracji uszkodzeń powstałych w procesie druku.
5. W przypadku wyników prezentowanych na rysunkach 78 i 79, dotyczących aktywacji prototypów, brakuje wyraźnej informacji o liczbie przeprowadzonych powtórzeń tych prób, co jest kluczowe dla oceny powtarzalności działania zaprojektowanych mechanizmów.
6. W rozdziale poświęconej właściwościom termomechanicznym żywicy SMEp dostrzeżono istotną niespójność w prezentowanych danych ilościowych. W Tabeli 15 (str. 144), podsumowującej standardowe cykle termomechaniczne, średnia wartość jednoosiowej rozszerzalności cieplnej (uniaxial thermal expansion) dla próbki SMEp1 wynosi 5,1%. Natomiast w Tabeli 16 (str. 147), dotyczącej deformacji indukowanej wyłącznie termicznie, dla tego samego materiału i przy identycznych warunkach ogrzewania, podano wartość 5,91%. Z uwagi na fakt, że Doktorantka traktuje rozszerzalność cieplną jako kluczowy parametr wpływający na precyzję struktur 4D i uwzględnia ją bezpośrednio w obliczeniach parametrów odzysku kształtu, taka rozbieżność wymaga wyjaśnienia. Brak spójności rodzi wątpliwość co

do powtarzalności wyników. Proszę o wskazanie źródła tych różnic i wyjaśnienie, która wartość powinna być uznana za wiarygodną.

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego i aktualnego problemu naukowego w dziedzinie nowoczesnych technologii wytwarzania. Mgr inż. Mana Nabavian Kalat wykazała się pełną samodzielnością badawczą oraz wysokimi kompetencjami w zakresie planowania i realizacji złożonych procedur eksperymentalnych. Szczególną wartość pracy stanowi umiejętne połączenie projektowania geometrycznego z dogłębną charakterystyką materiałową, co pozwoliło na opracowanie przewidywalnych struktur typu shape-morphing. Uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój inżynierii materiałów inteligentnych oraz technologii druku 4D. Całość przedłożonej dokumentacji potwierdza przygotowanie teoretyczne i warsztatowe Doktorantki na poziomie wymaganym od osób ubiegających się o nadanie stopnia doktora.

Wniosek końcowy

W mojej ocenie przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Many Nabavian Kalat pt.: „Thermomechanical Properties of Additively Manufactured Shape Memory Epoxy for Advanced Shape-Morphing Applications” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim określonym w art. 187 ustawy z dn. 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) dlatego wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Pani mgr inż. Many Nabavian Kalat do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.