

dr hab. inż. Rafał Chatys, prof. uczelni
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Al. 100-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314, Kielce

Kielce, dn.12.09.2022

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Sikory nt.:

„Analiza zmian właściwości termomechanicznych tworzyw polimerowych i ich wpływu na proces obróbki skrawaniem”

wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Adama Gnatowskiego, prof. uczelni
i promotora pomocniczego dr inż. Rafała Gołębskiego
z Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej

Podstawą do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Sikory stanowi pismo Prof. dr hab. inż. Małgorzaty Klimek Dziekan Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej z dnia 22 sierpnia 2022r.

1. Uwagi ogólne o rozprawie

Rozprawa doktorska pod wymienionym wyżej tytułem, została napisana na 231 stronach wraz ze spisem 137 pozycji literaturowych (włączając 15 źródeł elektronicznych i 10 norm), suplement (w postaci 11 tablic uzyskanych od producenta firmy Ensinger dla 11 materiałów polimerowych) oraz wykaz najważniejszych symboli i skrótów. Praca podzielona została na trzy części. W części teoretyczno-przebiegowej omówiono stan wiedzy dotyczący metod i stosowanych maszyn (urządzeń) oraz wpływu obróbki na właściwości materiałów o osnowie polimerowej szczególnie po obróbce skrawaniem. Na przykładzie materiałów polimerowych (jak Polieteroeteroketon – PEEK, Poliacetal – POM, Poli(tetrafluoroetylen) – PTFE, Polipropylen – PP Poliwęglan – PC, Polietylen – polimer etenu, Fluorek poliwinylidenu – PVDF), Doktorant oprócz właściwości i modyfikacji, przedstawił ich szerokie zastosowanie ze względu na bardzo dobrą skrawalność szczególnie do przekładni mechanicznych (których rodzaje scharakteryzował w podrozdziale 1.2). Drugi rozdział zawiera odpowiednio cele i cztery tezy oraz zakres rozprawy. W części eksperymentalnej w którego skład wchodzi siedem rozdziałów, zaprezentowano metodologię i wyniki badań w zależności od zastosowania komponentu polimerowego z uwzględnieniem obróbki frezowaniem kół zębatych

walcowych z modyfikacją wzdłużną metodą wielokrotnych przejść przed i po obróbce cieplnej. Przyjęty przez Autora schemat organizacji pracy nakreślił przejrzystość rozprawy, ale i spowodował pojawienie się pytań dotyczących narzędzi niezbędnych do realizacji postawionego w rozprawie zadania.

Wybór tematu rozprawy jest trafnie dobrany zarówno z teoretyczno-poznawczego jak i przede wszystkim użytecznego punktu widzenia.

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Sikory podejmuje dość złożony i aktualny temat jakim jest wieloetapowy proces przetwarzania (przetwórstwa) polimerów obejmujący procesy obróbki (tj. wstępnej, zasadniczej oraz wtórnej). Nie należy zapominać o wpływie na skrawalność różnego rodzaju dodatków (stabilizatorów termicznych, środków tiksotropowych, plastyfikatorów jako zmiękczaczy, kompatybilizatorów, napelnaczy, antyutleniaczy czy nośników) stosowanych w przetwórstwie materiałów o osnowie polimerowej.

Należy wyeksponować dobre przygotowanie warsztatowe i merytoryczne Doktoranta rozprawy. Dowodzą temu badania uzupełniające, które zostały sfinalizowane w opracowaniu i wykonaniu koła zębatego walcowego dla przekładni mechanicznej o zębach prostych na frezarce CNC (z poziomą podziałnicą kątową) z uwzględnieniem procesu skrawania dla wybranych przed (i po) modyfikacji cieplnej polimerów.

Zagadnienia poruszane w pracy są ciągle aktualne, a rozwiązania ich stanowią mogą nieocenioną pomoc przy poprawie skrawalności nowych komponentów o osnowie polimerowej w wyniku zmian właściwości termomechanicznych w czasie procesu obróbki skrawaniem. Nie sposób nie dostrzec zawartych w pracy jej aspektów poznawczych. Chodzi tu głównie o zagadnienia związane z wpływem procesu obróbki skrawaniem w ustalonym zakresie wpływu modyfikacji cieplnej na parametry obrabianych elementów konstrukcji czy maszyn (w szczególności na stereometrię powierzchni, czy stabilność wymiarową).

Taka analiza może prowadzić do oceny stopnia krystaliczności, która jest tak ważną kwestią szczególnie w modyfikacji cieplnej polimerów.

2. Charakterystyka rozprawy

W części pierwszej rozprawy Doktorant przedstawia stan wiedzy dotyczący stosowanych metod i urządzeń przy szacowaniu właściwości materiałów o osnowie

polimerowej po obróbce skrawaniem. Wybrał i scharakteryzował właściwości, podał przykłady modyfikacji, oraz zastosowań materiałów polimerowych stosowanych w obróbce skrawaniem, oraz omówił wpływ różnych rodzajów dodatków na polepszenie odporności termicznej, chemicznej, właściwości mechanicznych czy przetwórczych (jak środki ślizgowe, mieszanki polimerowe jako środki tiksotropowe, czy napelniacze). Dość szczegółowo przedstawił substancje jako dodatki (w postaci plastyfikatorów, zmiękczaczy, kompatybilizatorów, napelniaczy, ..., itd.) wpływające na poprawę właściwości użytkowych polimerów (np. obniżenie temperatury zeszklenia, co pozwala na użytkowanie polimeru w stanie wysokoelastycznym, czy elastycznym, także w niskich temperaturach – tabela 1.3, czy wzajemną mieszalność polimerów, obniżenie ich skurczu i poprawę niektórych właściwości – tabela 1.4), poszerzając w ten sposób zdolności aplikacyjne tych polimerów.

Doktorant przeanalizował wpływ parametrów procesu (tj. szybkość cięcia, toczenia czy wydajności procesu, wpływ dodatków w postaci różnego rodzaju wzmocnień, oraz nanoszonych specjalnych powłok) na właściwości polimerów (tworzyw) po obróbce skrawaniem mając na względzie poprawę walorów użytkowo – estetycznych powierzchni materiału. Osiągnięcie tych walorów Autor pracy widzi poprzez dodatkowe zabiegi jak: zamszowanie, drukowanie, metalizacja, lakierowanie czy obróbka powierzchni. Zaś stan warstwy wierzchniej jakim jest uzyskanie zadawalających parametrów chropowatości (tabela 1.6), co sugeruje Doktorant, można osiągnąć poprzez precyzyjnie zaplanowanie procesu technologicznego obróbki polimeru, jakim jest między innymi obróbka termiczna (czyli zaplanowanie procesu wygrzewania umożliwiającego modyfikację struktury polimeru). Klasyfikację różnych rodzajów przekładni mechanicznych służących do przenoszenia energii lub precyzyjnego ruchu (w większości przypadków umożliwiających zmianę momentu obrotowego i prędkości obrotowej w wyniku zazębiania się elementów przekładni – rys.2.1) zawarto w podrozdziale 1.2.

W drugim rozdziale Autor pracy nakreślił cel rozprawy jako analizę zmian właściwości termomechanicznych komponentów o osnowie polimerowej (tworzyw) i ich wpływu na proces obróbki skrawaniem, oraz cztery tezy i zakres badań.

Powyższe założenia i analizy posłużyły wybraniu 11 materiałów o strukturze krystalicznej, których charakterystyki i właściwości mechaniczne omówiono odpowiednio w rozdziale trzecim i suplementie (znajdującym się na końcu rozprawy).

W pracy wskazano również, jak ważna jest metodyka eksperymentalna, podkreślając jej ciągłą ewolucję, co zawiera trzecia część rozprawy. Z wytypowanych komponentów polimerowych (tj. Teflon – PVDF oraz Polietylen –

ultrawysokomolekularny pod nazwą PE1000) wykonano badania wstępne w rozdziale czwartym. Na podstawie obliczeń analitycznych zarysu, opracowano program obróbki metodą wielokrotnych przejść dla modyfikacji wzdłużnej i poprzecznej linii zębów. Następnie metodą wielokrotnych przejść wykonano koła zębate walcowe o zębach prostych frezarką CNC oraz próbki, które poddano oprócz badaniom wytrzymałościowym (zg. PN-EN ISO 527-2:2012), również procesowi modyfikacji termicznej (wygrzewaniu metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC – Differential Scanning Calorimetry) i określeniu właściwości dynamicznych (metodą DMTA – Dynamic Mechanical Thermal Analysis).

Autor rozprawy w badaniach wstępnych stwierdza polepszenie właściwości wytrzymałościowych materiału oraz znaczącą poprawę skrawalności dla PVDF Tefalona po obróbce cieplnej, co świadczy o większym stopniu krystaliczności (termogramy DSC) oraz kruchości materiału. Również po wygrzaniu polimer PVDF wykazują wyższą odpowiednio sztywność i tłumienie drgań, czego nie możemy powiedzieć o PE1000. Tefalon (PVDF) charakteryzuje się lepszą podatnością na skrawanie posiadając lepszą zdolność odwarstwiania materiału podczas obróbki ze znacznie większym posuwem – rys. 4.20, który nie powodował pogorszenia chropowatości o czym świadczy parametr R_a (R_a – średnia arytmetyczna odchylenia profilu od linii średniej). W obrabianej powierzchni nie zauważono zmian w odniesieniu do badanego polietylenu (pod nazwą PE1000), który po wygrzaniu wykazał niewielkie zmiany właściwości termicznych a właściwości dynamiczne (jak sztywność i tłumienie drgań) nie uległy poprawie.

Zasadność przeprowadzonych wstępnych badań posłuży w rozdziale piątym ocenie struktury powierzchni dla 5 polimerów przy analizie odpowiednio chropowatości (na profilometrze stykowym CNC SV-C4500CNC) i topografii (na mikroskopie 3D) przed i po obróbce cieplnej.

Natomiast z otrzymanych termogramów ze skaningowej kalorymetrii różnicowej DSC, Autor rozprawy dla wybranych materiałów polimerowych w rozdziale szóstym, wykazał dodatni wpływ założonej obróbki termicznej i stopnia krystaliczności (oprócz tworzyw polimerowych jak: Tefalona AD natural, oraz Tefalona AH natural). Ponadto stwierdził dla większości badanych polimerów zmniejszenie zakresu temperatury topnienia fazy krystalicznej pomiędzy próbkami nie poddanymi obróbce cieplnej a próbkami poddanymi obróbce cieplnej (z wyjątkiem: Tefalona AD natural, Tecast T MO, Tefalona AH natural).

Po czym Doktorant przedstawił i przeanalizował właściwości termomechaniczne polimerów poprzez moduł zachowawczy (wyznaczony metodą DMTA) w funkcji

temperatury (rozdział 7), którego wartości się polepszały w początkowych wartościach temperatury dla materiałów polimerowych przed i po obróbce cieplnej. Natomiast w całym zakresie temperaturowym moduł wzrastał dla większości próbek polimerowych wygrzanych względem próbek niewygrzanych, czego nie można powiedzieć w fazie przejścia szklanego.

Rozdział ósmy zawiera numeryczne modelowanie obróbki frezowaniem w programie Ansys, gdzie wartość maksymalnych i średnich wartości zredukowanych odkształceń wg Misses'a określają wartość modułu elastyczności, oraz wytrzymałość na zgniatanie. W kolejnym rozdziale przedstawiono proces wykonania kół zębatych na tokarce CNC.

3. Oryginalność rozprawy

Oryginalnymi i istotnymi osiągnięciami naukowymi Autora rozprawy doktorskiej, przedstawionymi w recenzowanej rozprawie są:

- wyniki z przeglądu literatury dają cenne kompendium wiedzy, wzbogacone wiedzą kompleksowych analiz odpowiednio wpływu obróbki cieplnej i parametrów powierzchni komponentów polimerowych firmy Ensinger z uwzględnieniem zmian właściwości termomechanicznych po obróbce frezowaniem.
- wykonana symulacja procesu obróbki skrawaniem dla wybranych materiałów polimerowych firmy Ensinger, w celu wykonania kół zębatych dla przekładni mechanicznej (za pomocą wielokrotnych przejść) z różnymi wartościami odkształceń zredukowanych według teorii Misses'a przy różnym obciążeniu (tj. od wartości modułu elastyczności dla próby zrywania oraz wytrzymałości na rozciąganie).
- obróbka kół zębatych dla przekładni mechanicznej wykonanej w wysokiej klasie dokładności z komponentów (tworzyw) polimerowych szczególnie po procesie wygrzewania, w wyniku znaczącej poprawy skrawalności polimeru.

Pomimo niewątpliwych zalet rozprawy, Doktorant nie ustrzegł się w niej także niedomówień. Zaliczam do nich:

- Brak konkretnego zastosowania dla zbadanych 11 polimerów, które w funkcji temperatury zmieniały swoje właściwości mechaniczne (np. moduł zachowawczy), co skutkuje ich aplikacją w eksploatacji maszyn i urządzeń;
- W pracy w badaniach wstępnych i zasadniczych obróbki kół zębatych przedstawiono odmienne rodzaje technologiczne obróbek. W badaniach

wstępnych wykorzystana została metoda obróbki frezowaniem, narzędziem o zakończeniu kulistym, natomiast w badaniach zasadniczych użyto do realizacji obróbki tokarki CNC z narzędziami napędzanymi – frezowanie częścią walcową frezu. Proszę o wyjaśnienie tego faktu tj. dlaczego autor zastosował dwa odmienne technologiczne sposoby obróbki? Czy i w jakim zakresie może to mieć wpływ na uzyskane wyniki badań obróbki kół zębatych?

- W pracy została bardzo obszernie przeprowadzona analiza parametrów obrobionych powierzchni. Autor zaprezentował szereg wyników amplitudowych chropowatości oraz funkcyjnych. W pracy nie przedstawiono analizy wolumetrycznej parametrów funkcyjnych powierzchni dla badań zasadniczych. Proszę o wytłumaczenie dlaczego?
- Autor, opracował na podstawie obliczeń prezentowanych w rozdziałach 4 i 9 program obróbki kół zębatych. Nie został umieszczony w pracy kod programu a także brak szczegółowego sposobu obliczeń (dyskretyzacji) zarysu dla badanych przypadków kół zębatych. Proszę o komentarz w tej kwestii.
- Podczas obróbki z wykorzystaniem narzędzi napędzanych zastosowane zostało narzędzie o małej średnicy (3mm). W związku z powyższym czy dla przedmiotowego narzędzia została osiągnięta nominalna prędkość skrawania?
- W badaniach różnicowej kalorymetrii skaningowej Doktorant przedstawił termogramy wykonane podczas ogrzewania polimeru (tworzywa). Dlaczego nie badano materiałów w pełnym cyklu: ogrzewania, chłodzenia i ponownego ogrzewania?
- W badaniach różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC Doktorant uzyskał znaczny wzrost wartości entalpii topnienia, ale nie dla wszystkich badanych komponentów o osnowie polimerowej (tworzyw), a zastosowane parametry wygrzewania były jednakowe dla wszystkich próbek. Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie przyczyn zmian entalpii badanych polimerów po procesie wygrzewania.
- Czy Doktorant rozprawy brał pod uwagę i badał wpływ wygrzewania na wymiary badanych próbek. Czy był ten aspekt badań brany pod uwagę przy planowaniu dalszych badań technologicznych – obróbki?
- na str.25 brak objaśnień w tabeli 1.4;
- na str.70 nie zgadza się opis rys.4.13 i rys.4.14 – powinno być rys.4.12 i rys.4.13;
- Proszę o objaśnienie wzoru 7 na str.33;

- Oprócz jednej pozycji brak dorobku publikacyjnego Doktoranta w przedstawionej rozprawie. Pomimo braku odniesienia się przez Doktoranta do autorskich prac, stwierdzam, że Doktorant jest współautorem następującej pracy naukowej o zasięgu międzynarodowym:

1. Gnatowski A., Gołębski R., Sikora P.: Analysis of the Impact of Changes in Thermomechanical Properties of Polymer Materials on the Machining Process of Gears. Polymers, vol.13(1), 28 2020 pp.1-16 – 100 pkt.

Prosiłbym o weryfikację pozostałych prac Doktoranta.

- Niepotrzebnie wnioski i uwagi końcowe ujęte zostało jako rozdział rozprawy.

4. Ocena końcowa rozprawy

Powyższe uwagi krytyczne nie zmieniają ogólnej wysokiej oceny przedstawionej do recenzji rozprawy. Uważam, że zaproponowana przez Doktoranta metodyka (czy zakres badań – procedur) analizujący właściwości termomechaniczne komponentów polimerowych firmy Ensinger po obróbce cieplnej, w wyniku znaczącej poprawy skrawalności polimeru, wzajemnie się uzupełniają.

W podsumowaniu stwierdzam co następuje.

Rozprawę doktorską mgr inż. Piotra Sikory oceniam **wysoko**, gdyż przedstawia oryginalne własne badania naukowe. Doktorant wykazał się nie tylko obszerną wiedzą z obróbek odpowiednio termicznej i termomechanicznej oraz procesu skrawania, modelowania, technologii wykonania kół zębatych dla przekładni mechanicznej oraz metod eksperymentalnych, ale również dużym wyczuciem i dojrzałością naukową w formowaniu zagadnień i realizacji rozważań. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, że mgr inż. Piotr Sikora ma bardzo dobre przygotowanie merytoryczne i doświadczalne do samodzielnej pracy naukowej. Uważam, że niniejsza rozprawa **spełnia wszystkie wymagania** stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą ustawę o Stopniach i Tytule Naukowych (z dnia 20 lipca 2018r. "Prawo o szkolnictwie wyższym") i wnoszę do Komisji Rady Narodowej Dyscypliny o dopuszczenie mgr inż. Piotra Sikory do publicznej obrony recenzowanej pracy.