

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Zajdel nt.: „**Hybrydowe kompozyty polimerowe stosowane na elementy w branży automotive**”

Promotor: prof. dr hab. inż. Mariusz Oleksy

Promotor pomocniczy: dr inż. Bartłomiej Sobolewski

Podstawa opracowania: pismo RM-530-16-01/19/2023 z dnia 18 lipca 2023 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz.

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 232 strony, a w tym: 3 str. spisu treści, 3 str. celu i zakresu pracy; 4 str. wykazu skrótów stosowanych w pracy; 3 str. wprowadzenia; 181 str. głównej części pracy zawierającej 3 rozdziały; 7 str. podsumowania i wniosków; 18 str. wykazu literatury (200 pozycji) oraz 2 str. streszczenia w języku polskim i 2 str. streszczenia w języku angielskim.

W celu i zakresie pracy (s.9 - s.11) Autorka rozprawy podkreśla, że rozwój seryjnej produkcji nowych materiałów kompozytowych otwiera możliwości poszerzenia oferty produkcyjnej wyrobów z tych materiałów. W ślad za tym musi być prowadzona rygorystyczna kontrola jakości i diagnostyki wyrobów wprowadzanych na rynek, w których są montowane elementy kompozytowe.

Celem podjętej rozprawy doktorskiej jest opracowanie i zbadanie kompozytów na podstawie termoplastycznych tworzyw konstrukcyjnych, przeznaczonych na koła zębate dla przemysłu motoryzacyjnego. Planowane badania doświadczalne zostały nakierowane na zwiększenie sprawności zaprojektowanej przekładni oraz na obniżenie zużycia kół zębatach wytwarzanych z tworzyw sztucznych o zmodyfikowanym składzie.

Doktorantka podkreśla też, że „...niewiele jest prac poświęconych zasadom postępowania przy konstrukcji elementów motoryzacyjnych z użyciem materiałów polimerowych, ich kompozytów i nanokompozytów”.

Zatem podjęcie przez Autorkę rozprawy kompleksowych badań nad opracowaniem i możliwością przemysłowego wdrożenia technologii nowych, hybrydowych materiałów kompozytowych jest w pełni uzasadnione.

Doktorantka wyselekcjonowała grupy materiałów, które zostały poddane modyfikacji w celu uzyskania dobrych właściwości fizykochemicznych i użytkowych. Osnowę polimerową stanowią tworzywa konstrukcyjne z grupy poliamidów: PA6, PA6.6, PA4.6 i PPA. Do badań wykorzystano także tworzywa kompozytowe: włókno szklane (GF) i politetrafluoroetylen (PTFE). Wytypowane materiały zostały zmodyfikowane technologią wytłaczania z dodaniem napełniaczy - wielościennych nanorurek węglowych (CNT) oraz dodatków pomocniczych - środków smarnych, kompatybilizatora.

W następnej części pracy przeprowadziła optymalizację składu ilościowego i jakościowego badanych, termoplastycznych kompozytów, określiła ich właściwości fizykochemiczne i mechaniczne. Na podstawie tych opracowań wytypowała ostateczne kompozyty na model pary kół zębatach o zębatach prostych oraz konstrukcję badanej przekładni.

W ostatniej części pracy Autorka rozprawy doktorskiej podjęła badania technologii wtryskiwania polimerowych kół zębatach oraz wykonała testy trwałościowe na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, będącym w Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki

Rzeszowskiej. Wykonała eksperymentalne serie badanych wyrobów z ukierunkowaniem badań na optymalizację gniazd formujących oraz na sprawdzenie poprawności wykonania układów wlewowych. Przeprowadziła również kontrolę dokładności wymiarowej wykonanych wyrobów.

Mgr inż. M. Zajdel przygotowała program cykli badawczych oraz przeprowadziła badania eksploatacyjne trwałości i żywotności przekładni zębatych dla różnych kombinacji prędkości i zmiennych momentów obrotowych. Na podstawie wyników badań z wykorzystaniem zmodyfikowanych dwóch materiałów stwierdziła, że nastąpiło obniżenie temperatury w miejscu styku współpracujących zębów przekładni oraz brak ich uszkodzeń.

Mgr inż. M. Zajdel potwierdziła tym samym, że założony cel rozprawy doktorskiej jest realny, a opracowany kompozyt ma szanse być zastosowanym w produkcji elementów dla przemysłu samochodowego. Podjęła więc szczegółowe analizy i badania.

Rozdział I - wstęp teoretyczny (s.21 - s.86) zawiera obszerną analizę aktualnego stanu wiedzy z zakresu właściwości i stosowania materiałów polimerowych na części maszyn.

I.1. W charakterystyce wybranych materiałów polimerowych stosownych do otrzymywania elementów maszyn Doktorantka stwierdza m.in., że *„w porównaniu do metali oraz ich stopów, tworzywa sztuczne dają nieograniczoną elastyczność tworzenia kompozytów polimerowych z uwzględnieniem relatywnie niższych kosztów materiałowych i przetwórczych”*.

Wg mnie jest to myśl przewodnia i uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy doktorskiej. Analizując właściwości materiałów polimerowych Autorka rozprawy zwraca uwagę na dużą zmienność właściwości tworzyw polimerowych w zależności od warunków pracy wykonanych z nich elementów. Zatem uzasadnione i konieczne jest przeprowadzenie odpowiednich badań w warunkach eksploatacyjnych wyrobów wykonanych z polimerów.

Polimery termo- i chemoutwardzalne nie ulegają ponownemu uplastycznieniu, a pod wpływem podwyższonej temperatury lub substancji sieciującej przekształcają się w nietopliwy, usieciowany produkt. Stopień usieciowienia ma istotny wpływ na ich właściwości mechaniczne.

Tworzywa termoplastyczne uplastyczniają się pod wpływem temperatury, a po chłodzeniu odzyskują swoje pierwotne właściwości. Mogą one mieć strukturę amorficzną (bezpostaciową) lub semikrystaliczną. Charakterystycznym przykładem jest zależność współczynnika tarcia od temperatury (rys.2). Do najczęściej stosowanych konstrukcyjnych termoplastów, stosowanych na precyzyjne elementy maszyn należą: poliacetale (POM), Poliamidy (PA) i polieteroeteroketon (PEEK). Właściwości fizykochemiczne POM zostały przedstawione w tab.1.

Doktorantka przedstawiła wyniki badań kół zębatych z polioksymetylenu (POM), prezentowane w literaturze. Wzrost obciążeń przekładni wskutek zużycia ściernego prowadzi do wzrostu naprężeń oraz wzrostu temperatury w strefie kontaktu i zniszczenia zębów (rys6).

Drugą grupą polimerów w tribologicznych zastosowaniach, zaprezentowanych przez Autorkę rozprawy są poliamidy (PA), z których wzięta pod uwagę poliamidy z grupy PA 6, PA 6.6, PA 4.6.

Poliamid PA6 wyróżnia się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, sztywnością i odpornością na zużycie mechaniczne. Jest odporny na benzynę i oleje. Charakterystyka właściwości fizykochemicznych została ujęta w tab.2. Stosuje się go w kołach zębatych, przekładniach, złączach i łożyskach ślizgowych, a w przemyśle samochodowym do produkcji części przenoszących obciążenia.

Poliamid PA6.6 jest tworzywem o znacznie większej wytrzymałości mechanicznej i odporności chemicznej w porównaniu do PA6. Posiada niższą zdolność tłumienia drgań i niższą udarność. Stosuje się go w produkcji poduszek powietrznych, pasów napędowych, kół zębatych, elementów łożysk. Właściwości użytkowe PA 6.6 zostały przedstawione w tab.3.

Poliamid PA4.6 cechuje wysoki moduł sprężystości, dobra udarność, odporność na pełzanie i wytrzymałość zmęczeniowa. Wadą jego jest mniejsza stabilność wymiarowa w porównaniu do PA6.6. Właściwości fizykochemiczne PA4.6 zostały podane w tab.4.

Badania przekładni zębatych wykonanych z poliamidów (w różnych zestawach: poliamid - metal; poliamid - poliamid) prezentowane w literaturze dotyczyły głównie zużycia zębów. Interesujące było porównanie rozprzewadzenia ciepła wytworzonego w polimerowym kole zębatym przekładni metal-poliamid PA6 z zębami o pełnym profilu oraz z nawierconymi otworami w korpusie (rys.11). Wykazano, że nawiercone otwory powodowały obniżenie temperatury powierzchni zębów PA6, a to zwiększyło także odporność zmęczeniową materiału.

Z tych badań wynika, że głównymi przyczynami mechanicznego niszczenia zębów z PA są: zużycie zmęczeniowo-ścierne oraz pełzanie materiału wskutek wzrostu temperatury współpracującej powierzchni.

Semikrystaliczny polifalamid PPA zachowuje swoje właściwości mechaniczne w temperaturze do ok. 130°C, nieosiągalnej dla odmiany amorficznej. Właściwości fizykochemiczne PPA zostały przedstawione w tab.5. W przemyśle motoryzacyjnym jest między innymi stosowany w układach paliwowych, w budowie osłon, wsporników układów napędowych, elementów podwozia i nadwozia, pomp, zaworów, siłowników.

Polieteroeteroketon PEEK cechuje wysoka stabilność wymiarowa w wysokich temperaturach - w warunkach pracy ciągłej do 250°C, a w pracy krótkotrwałej do 300°C. Posiada bardzo dobre właściwości mechaniczne, dobrą odporność zmęczeniową oraz wysoką odporność na promieniowanie UV, gamma i rentgenowskie. Wadą PEEK jest konieczność stosowania wtryskarek mogących osiągać temperaturę cylindra 400°C i specjalistycznego systemu chłodzenia.

PEEK stosuje się do wytwarzania pierścieni uszczelniających, podkładek oporowych, kół zębatych, tulei i łożysk, a także na implanty ortopedyczne, stomatologiczne, kręgosłupa i czaszki. Jest też szeroko stosowany w druku 3D. Właściwości fizykochemiczne PEEK zostały ujęte w tab.6.

Badania trwałości kół zębatych z polieteroeteroketonu PEEK przekładni: stal C45- PEEK w zamkniętym obiegu mocy i w warunkach suchobieżnych wykazały, że po $5,0 \cdot 10^4$ cykli zęby PEEK uległy znacznemu uszkodzeniu. Rozwój zużycia następował stopniowo poprzez uszkodzenia termiczne i topienie się tworzywa.

W wariacie testu ze smarowaniem zewnętrznym, po osiągnięciu $1 \cdot 10^4$ cykli koło zębate z PEEK posiadało niewielkie wżery, bez uszkodzeń termicznych w obszarze: średnica podziałowa - wierzchołek zęba. Dodatkowe smarowanie zewnętrzne okazało się korzystne dla poprawy trwałości przekładni. Następnie Doktorantka przedstawia przykłady zastosowania tworzywa PEEK w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych wyrobów.

Główne **wnioski z analizy literatury** nt. badań polimerowych kół zębatych wskazują, że:

- największa liczba artykułów dotyczy testów przekładni z materiału POM;
- POM posiada szereg zalet, jak: dobre właściwości mechaniczne, stabilność wymiarowa, samosmarowalność, relatywnie niska cena. Posiada też pewne wady, a przede wszystkim niską odporność termiczną, co eliminuje go z w wysoko obciążonych przekładni zębatych;
- poliamidy PA cechują: dobre właściwości mechaniczne, zmęczeniowe, możliwość pracy w wysokich temperaturach;
- materiał PEEK charakteryzuje się najlepszymi właściwościami mechanicznymi, ale jego koszt oraz konieczność stosowania specjalnych, kosztownych wtryskarek, termostatów i szeregu urządzeń peryferyjnych do pracy w wyższych zakresach temperatur ogranicza (a wręcz wyklucza) to tworzywo z badań i zastosowań.

Aby poprawić właściwości użytkowe polimerów stosuje się różnego typu napelniacze i inne specjalistyczne środki w celu **modyfikacji ich właściwości mechanicznych** (rys.1.5).

Modyfikacja chemiczna tworzyw termoplastycznych bazuje na reakcji chemicznej w celu zmiany ich składu chemicznego i właściwości.

Modyfikacja fizyczna tworzyw termoplastycznych polega na zmianie właściwości fizykochemicznych polimeru przez wprowadzenie dodatkowych składników. Dodatki poprawiające właściwości polimerów stosowanych w przekładniach zębatych stanowią napełniacze włókniste oraz napełniacze i środki smarne. Tym zagadnieniom Doktorantka poświęciła kolejne analizy opracowań prezentowane w publikacjach.

Napełniacze włókniste: włókno szklane, aramidowe i węglowe są najczęściej stosowanymi wzmocnieniami osnowy polimerowej w kompozytach. Formowanie wtryskowe tworzyw termoplastycznych, wzmacnianych krótkimi włóknami jest jednym z rodzajów kompozytów. Wadą takich materiałów jest to, że podczas wtryskiwania siły ścinające sprzyjają skracaniu długości napełniacza, a w efekcie obniżeniu wytrzymałości kompozytu.

Włókno szklane (glass fiber, GE) typu E posiada niską przewodność cieplną, niską wytrzymałość zmęczeniową, ale dobrą wytrzymałość na rozciąganie oraz na ściskanie.

Włókno węglowe (carbon fiber, CF) wytwarzane z poliakrylonitru (PAN) jest wzmocnieniem w kompozytach, które są stosowane na łopaty śmigłowców, części silników i satelitów. Wzmocnienie węglowe poprawia odporność na ścieranie oraz zużycie powierzchniowe. Właściwości fizykomechaniczne włókna szklanego i węglowego zostały przedstawione w tab.7. Nanocząstki diamentu i fulereny należą do napełniaczy nanokompozytów znacząco poprawiających ich właściwości mechaniczne, w efekcie wydłużając czas eksploatacji wyrobów.

Autorka rozprawy dość obszernie analizuje prezentowane w literaturze **badania eksploatacyjne kół zębatych, wykonanych z polimerów modyfikowanych za pomocą włókien**. Stwierdziła, że „... wprowadzenie do osnowy polimerowej włóknistego wzmocnienia w znaczny sposób wpłynęło na wytrzymałość przekładni... poprawie uległy właściwości wytrzymałościowe i przewodnictwo cieplne stosowanego materiału”.

Środki smarne są skutecznym sposobem na zmniejszenie tarcia poprzez wprowadzenie filmu smarnego pomiędzy współpracujące powierzchnie zębów. Środki smarne mogą także wspomagać odprowadzenie ciepła ze strefy kontaktu, spowalniać korozję, a także tłumić drgania.

Główną metodą wytwarzania polimerowych kół zębatych jest **formowanie wtryskowe**. Zaletami tej technologii w produkcji wielkoseryjnej są: wysoka powtarzalność parametrów geometrycznych wyprasek oraz ich właściwości mechanicznych. Doktorantka omówiła i przedstawiła fazy oraz czasy trwania poszczególnych etapów cyklu wtryskiwania (rys.19). Szczegółowo scharakteryzowała warunki realizacji technologii wtrysku.

Zwróciła też uwagę na istotną wadę technologii wtrysku polimerów, którą jest kurczenie się w trakcie chłodzenia w gnieździe formy (skurcz pierwotny) oraz po ich usunięciu (skurcz wtórny). Skurcz i deformacje zależą od szeregu czynników, tj.: właściwości termicznych materiału polimeru, jego ściśliwości, geometrii wypraski oraz od konstrukcji formy wtryskowej.

Polimerowe koła zębate mogą być wykonywane za pomocą technologii ubytkowych i/lub addytywnych. Doktorantka trafnie zwróciła uwagę, że polimery nie są dobrym tworzywem do obróbki ubytkowej. Podczas procesu skrawania problemy z ich plastycznością niskim modułem Younga i przewodnością cieplną wpływają niekorzystnie na jakość technologiczną obrabianej powierzchni.

W produkcji jednostkowej i małoseryjnej preferowane są technologie przyrostowe do wykonywania wyrobów z tworzyw sztucznych. Jednak technologia druku 3D może być efektywnie zastosowana do niektórych, wybranych materiałów polimerowych ze względu na niższą wytrzymałość mechaniczną i dokładność wymiarową.

W dalszej części rozprawy Doktorantka prezentuje podstawowe wymiary geometryczne walcowego koła zębatego (rys.20 - rys.22) oraz tok obliczeń (wzory 1 - 16).

Problemem jest trwałość przekładni zębatych, a w szczególności dotyczy to uzębień polimerowych. Koła zębate są narażone na zmienne naprężenia w zależności od punktu styku współpracujących powierzchni, co może powodować zmęczenie materiału i pęknięcia u podstawy zęba. Również maksymalne obciążenie termiczne występuje w obszarze styku pary zębów jako efekt działania sił tarcia.

Dlatego też uwarunkowania tribologiczne stanowią istotny aspekt w ocenie pracy przekładni zębatych. Tym zagadnieniom Doktorantka poświęciła również sporo uwagi. Główne zalety i wady przekładni wykonanej z tworzyw sztucznych w porównaniu do przekładni stalowych ujęła syntetycznie w tab.8. Zawarte informacje uzupełniła przykładami zastosowań tworzyw sztucznych i kompozytów polimerowych w elementach maszyn z branży motoryzacyjnej (rys.23 - rys.27).

W podsumowaniu obszernego rozdziału I mgr inż. M. Zajdel stwierdziła między innymi, że: *„... Modyfikacja właściwości polimerów termoplastycznych do otrzymywania kół zębatych jest rzadkością i głównie opiera się na wprowadzeniu pojedynczego napełniacza do matrycy polimeru... Wprowadzenie do matrycy polimerowej tylko pojedynczego dodatku często nie daje gwarancji uzyskania pożądanego rezultatu właściwości użytkowych. Aby sprostać temu zadaniu przeważnie stosuje się układy hybrydowe, składające się z więcej niż jednego napełniacza. Połączenie wielu zalet formowania wtryskowego z ponadprzeciętnymi właściwościami uzyskanych w ten sposób materiałów pozwoli na zapewnienie całkowicie nowej jakości wytwarzania polimerowych kół zębatych i innych elementów branży automotive”.*

To podsumowanie analizy stanu wiedzy nt. technologii wytwarzania polimerowych kół zębatych jest równocześnie uzasadnieniem rozwinięcia własnych badań przez Doktorantkę.

Rozdział II - metodyka badawcza (s.87 - s.108) zawiera zwięzłe, szczegółowe informacje dotyczące przebiegu procedury rozwiązywania kolejnych etapów podjętego tematu. Przedstawiam je w bardzo skróconym ujęciu w ramach kolejnych zadań, aby ukazać zakres rozprawy doktorskiej.

II.1. Materiały zastosowane do badań zawiera 10 rodzajów poliamidów:

- poliamidy bazowe: **PA6; PA66; PA46**
- poliamidy modyfikowane: **PA6/30GF; PPA/35GF; PA6T/6I/30GF; PA66/6T/35GF; PA66/6T/50GF; PA46/PTFE; PA66/PTFE/30/GF**

Zastosowane napełniacze i modyfikatory:

- wielościennie nanorurki węglowe - oznaczenie **CNT**;
- środek smarny na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylowych - oznaczenie **SM**;
- kompatybilizator, chemicznie modyfikowany polietylen szczepiony bezwodnikiem maleinowym - oznaczenie **E926**

II.2. Aparatura i sprzęt laboratoryjny obejmuje 22 pozycje z podanymi oznaczeniami.

II.3. Otrzymywanie kształtek do badań właściwości mechanicznych. Przed wykonaniem kształtek materiały zostały poddane suszeniu (tab.9) Znormalizowane próbki zostały wykonane technologią formowania wtryskowego w Narzędziowni firmy Splast (tab.10 i rys.30).

II.4. Oznaczenie cech wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania. Wykonano po pięć powtarzalnych pomiarów zgodnie z normą PN-EN ISO 527.

- II.5.** Oznaczenie udarności wg Charpy'ego z karbem. Dla każdej serii wykonano pięć pomiarów zgodnie z normą PN-EN ISO/179/1eA
- II.6.** Oznaczenie twardości wg Shore D. Dla każdej serii wykonano pięć pomiarów zgodnie z normą PN-EN ISO 868
- II.7.** Analiza mikrostruktury wykonania za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Do obserwacji mikrostruktury materiałów zastosowano kruche przełomy. Przed badaniem SEM próbki kruchych przełomów napyłano warstwą złota z palladem.
- II.8.** Projekt geometrii dwóch kół zębatach. W programie Inventor zaprojektowano jednostopniową przekładnię zębatą o zębach prostych (KZ25 i KZ17) o niesymetrycznej geometrii kół zębatach, mającej eksponować wpływ skurczu przetwórczego (rys.31) i tab.11).
- II.9.** Symulacja numeryczna procesu wtrysku kół zębatach w programie Autodesk Moldflow Insight. Wykonano analizy numeryczne dla: umiejscowienia punktów wtrysku wraz z wyborem układu wlewowego; wyznaczeniem czasu i sposobu napełniania gniazda formującego; rozmieszczenia linii łączenia; ustalenia orientacji włókna szklanego podczas przepływu; określenia równomierności skurczu objętościowego oraz paczenia wypraski.
- II.10.** Projekt formy wtryskowej kół zębatach z wymiennym gniazdem formującym. Za pomocą programu Siemens NX12 zostały zaprojektowane elementy formujące, tj. matryce i stempel ze stali narzędziowej 1.2343 oraz korpus formy (tab.12). Gniazda formujące zostały wykonane obróbką elektroerozyjną.
- II.11.** Wtrysk kół zębatach KZ25 i KZ17 został wykonany zgodnie z parametrami wg tab.13.
- II.12.** Pomiar geometrii formy wtryskowej oraz kół zębatach za pomocą skanera optycznego Atos III Triple Scan 16M (rys.34). Strategia pomiarów została podporządkowana programowi Atos Professional V.2018. Na podstawie chmur punktów zostały utworzone kolorowe mapy odchyłek modelu 3D w porównaniu do rzeczywistej geometrii wykonanego elementu.
- II.13.** Pomiar dokładności geometrycznej wykonany za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40 firmy Klingelnberg z zastosowaniem strategii w programie GINA. Do pomiaru zarysu i linii zęba zostały wybrane trzy zęby rozmieszczone równomiernie na obwodzie. Bazami odniesienia były powierzchnia walcowa i powierzchnia koła mocowanego w uchwycie 3-szczękowym na stole maszyny P40.
- II.14.** Stanowisko do badań trwałości kół zębatach (rys.35 i rys.36) zostało wyposażone w układ napędowy z falownikiem Goodrive 10 do regulacji prędkości w zakresie od 200 obr./min do 955 obr./min , w dwa momentomierze typu MT 50 Nm oraz odpowiedni system rejestracji pomiarów (rys.36 - rys.38). Program badawczy został zaprogramowany na sterowniku przemysłowym HMI firmy Unitronics. Średnią z pomiarów wyliczano z trzech powtórzeń. Zużycie powierzchni bocznej kół zębatach mierzono za pomocą mikroskopu cyfrowego Keyence VHX-700N.
- II.15.** Otrzymywanie nowych kompozycji za pomocą wyciarki ślimakowej (rys.39) zostało podjęte po zakończeniu pierwszego cyklu badań oraz wstępnych serii testów przekładni zębatach. Doktorantka wytypowała trzy materiały: PA66/6T/35GF; PA46 i PA46/PTFE oraz dwa dodatki modyfikujące: środek smarny CNF i wielościennie nanorurki węglowe SM. W celu zapewnienia dobrej kompatybilizacji z osnową polimerową użyto środka E926. Zawartości poszczególnych składników zostały podane w tab.14., parametry procesu suszenia w tab.15 oraz parametry procesu wytłaczania mieszającego kompozytów w tab.16.

Rozdział III - analiza i omówienie wyników pracy (s.109 - s.201) dotyczy oceny zaproponowanych przez Autorkę rozprawy rozwiązań technologicznych z ukierunkowaniem ich na wdrożenie przemysłowe.

- III.1.** Analiza oznaczenia udarności wg Charpy'ego z karbem wykazała, że Poliamidy PA6 oraz PA66 posiadały porównywalną udarność. Natomiast we wszystkich materiałach, w których zastosowano napełnienie włóknem szklanym wystąpił wzrost odporności na dynamiczne pękanie w miejscu karbu (zestawienie wyników udarności - rys.40 i rys.41).
- III.2.** Analiza badań cech wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania została wykonana na podstawie pięciu powtarzalnych testów. Zestawienie wyników badań (tab.17 i tab.18) dla poliamidów PA6, PA66, PA46 i ich kompozytów potwierdziło wyraźny wpływ napełniaczy na zmianę tych cech (na ogół podwyższenie) w odniesieniu do kompozytów.
- III.3.** Analiza oznaczenia twardości wg Shore'a (rys.42 i rys.43) także potwierdziła wpływ dodatków na twardość kompozytów w porównaniu do polimerów bez dodatków. Interesujące jest też spostrzeżenie Doktorantki, że na próbce w miejscu położonym dalej od punktu wtrysku, a bliżej końca drogi płynięcia termoplastu uzyskano niższe wartości twardości. Tłumaczy to różnicami strukturalnymi, tj. udziałem fazy krystalicznej w masie polimeru.
- III.4.** Analiza mikrostruktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) została wykonana na kruchych przełomach w celu sprawdzenia rozmieszczenia napełniaczy oraz ich połączenia z matrycą polimerową (rys.44 i rys.45). Dla kompozytów PA66/6T/35GF i PA66/6T/50GF stwierdzono wysoką kompatybilność z polimerową matrycą. Natomiast dla kruchego przełomu kompozytu PA6T/6I/30GF wystąpiło przeciwne zjawisko, gdyż uwidoczniły się puste jamy. Ten efekt potwierdza gorsze wyniki parametrów wytrzymałościowych (tab.17) i udarnościowych (rys.41) dla kompozytu PA6T/6I/30GF.
- III.5.** Import modelu oraz poprawa siatki MES. Numeryczny zapis MES docelowych geometrii kół zębatych KZ25 i KZ17 (rys.46 i tab.19) wygenerowany automatycznie w programie Autodesk Inventor Professional został poddany ręcznej poprawie błędów.
- III.6.** Przeprowadzenie analiz wypełnienia gniazd formujących koła zębate. Na rys. 47 i rys.48 zostały przedstawione etapy symulacji wypełnienia gniazda formy z wkładką formującą koła KZ25. Analogicznie postąpiono dla koła KZ17. Przedstawiono wybrane etapy wypełnienia gniazda formy wtryskowej, obrazujące płynięcie stopu termoplastów w regularnych odstępach czasu. Na podstawie wyników tej analizy Doktorantka stwierdziła, że rozpatrywane typy kanałów wlewowych (tj. wlew z zimnym kanałem lub wlew z gorącym kanałem) mają nieznaczny wpływ na przemieszczanie się strugi tworzywa w rozpatrywanym gnieździe formy wtryskowej.

Na jakość technologiczną i użytkową wytworzonych kół z poliamidu wpływa ułożenie włókien w wyprasce. Symulacja orientacji włókien szklanych dla koła KZ25 (rys.49) potwierdza, że ułożenie włókien wpływa na sztywność i wytrzymałość na rozciąganie, intensywność zużycia ściernego w obszarze wierzchołka zęba.

Niepożądanym efektem zetknięcia się dwóch frontów przepływu polimeru są linie łączenia, powodujące miejscowe osłabienie wyrobu wskutek orientacji polimeru w spoinie. Analizy symulacyjne (rys.50) wykazały, że umiejscowienie linii łączenia w okolicy piasty może znacząco ograniczyć ich niekorzystny wpływ na wytrzymałość i trwałość wieńca.

Podobnie, również wyniki analizy skurczów (rys.51) umożliwiają wyeliminowanie odkształcenia spowodowanego różnicami wartości skurczów tworzywa w kierunku grubości ścianki i płaszczyzny przekroju podziału.

- III.7.** Analiza modelu formy wtryskowej kół zębatach, wyposażonej w dwie wymienne wkładki formujące koła KZ25 (rys.52) i KZ17 była podstawą do wykonania prototypu tej formy. Projekt prototypu został wykonany w programie Siemens NX 12.
- III.7.1.** W projekcie gniazda formującego (widok izometryczny - rys.53) uwzględniono pozostawienie naddatków technologicznych w miejscach występowania ryzyka deformacji, określonych poprzez analizę w programie symulacyjnym.
W projekcie formy zostały uwzględnione również obszary wielkości skurczów na podstawie analizy symulacji. Stosowne modyfikacje zostały ujęte poprzez przesunięcie bocznej ściany piasty koła KZ25 oraz odpowiednich pochyleń ścian bocznych (rys.54 i rys.55).
- III.7.2.** Na podstawie analiz symulacyjnych został dobrany zimnokanałowy wlew bezpośredni (rys.57). Miejsca położenia punktów wtrysku uwzględniały wpływ orientacji łańcuchów polimeru i włókna szklanego.
- III.7.3.** W układzie chłodzenia Doktorantka zaproponowała uproszczoną konstrukcję kanałów regulacji temperatury przy wydłużonym czasie chłodzenia wypraski z uwagi na prototypowe rozwiązanie (rys.58) i obniżenie kosztów.
- III.7.4.** Układ wypychaczy (rys.59) został zaprojektowany z uwzględnieniem samoczynnego i bezkolizyjnego wysunięcia i wycofania się tych elementów z gniazda formującego. Na podstawie przestrzennych modeli została opracowana odpowiednia dokumentacja technologiczna. Przykład: rysunki techniczne matrycy i stempla dla koła KZ25 (rys.60 i rys.61) oraz KZ17 (rys.62 - rys.63) uwzględniają wymagania firmy Splast.
- III.8.** Analiza procesu wtrysku kół zębatach z wykorzystaniem opracowanej formy wtryskowej została przeprowadzona w warunkach przemysłowych w firmie Splast z zastosowaniem materiału PA6/30GF. Głównym celem była ocena zgodności opracowanych kolejnych operacji technologicznych wykonania kół zębatach z przygotowaną dokumentacją konstrukcyjną. W wyniku tej weryfikacji zostały wprowadzone pewne korekty (rys.64 - rys.69) dotyczące: *wypełnienia gniazd formujących KZ25 i KZ17, masy wyprasek, wprowadzenia dodatkowych kanałów odpowietrzających na okrągłych wypychaczach, dodania zabieraków na rdzeniach wypychacza, dospawania wypychacza tulejowego i poprawa drążenia sześciu żeber w piastce.*
- Po wprowadzeniu korekt do wykonania kolejnych badań poprawności kształtowo-wymiarowej oraz testów trwałościowych przekładni zębatej zostało wykonanych po 25 szt. KZ25 i KZ17, czyli ok.600 szt. kół zębatach z różnych materiałów kompozytowych (rys.70).
- III.9.** Analiza geometrii wkładek formujących oraz wyprasek KZ25 obejmowała:
- ocenę dokładności geometrii gniazd formujących na podstawie pomiarów wytworzonej formy wtryskowej KZ25 i KZ17 (wyniki - rys.71 i rys.72);
 - analizę dokładności odwzorowania globalnej geometrii KZ25 i KZ17 w porównaniu do wzorca modelu bryłowego CAD. Bazą były trzy elementy geometrii dobrane tak, aby siatka mierzonego koła została dopasowana w możliwie najlepszym stopniu z nominalnym modelem CAD (rys.73). Dla KZ25 i KZ17 odniesieniem był punkt położony w osi każdego koła oraz prosta przechodząca przez środek koła i dwa przeciwległe żebra. Dla KZ25 płaszczyzną bazującą była boczna powierzchnia wieńca, a dla KZ17 płaska powierzchnia koła uformowana przez matrycę. Zostały wyznaczone i skomentowane przez Doktorantkę odpowiednie odchyłki wymiarowe (rys.74 - rys.76).
- Główną przyczyną odchyłek kół zębatach względem modelu CAD było to, że gniazda formy wtryskowej były zaprojektowane dla wybranego tworzywa, zaś w projekcie badaniom wtrysku były poddane różne materiały o różnym stopniu skurczu (tab.20).**

III.10. Analiza dokładności geometrycznej wykonanej wykonana za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40 została przeprowadzona w celu określenia dokładności geometrycznej oraz sprawdzenia powtarzalności procesu wtrysku. Obejmowała wymiary parametrów geometrycznych polimerowych kół zębatach oraz topografię zęba (rys.71 - rys.84 oraz tab.21 - tab.22). Uzyskane wyniki również zostały poddane ocenie merytorycznej przez Autorkę rozprawy.

III.11. Analiza badań trwałościowych przekładni zębatach z materiałów polimerowych została dokonana na podstawie badań wykonanych wg dwóch wariantów (rys.85); wariant 1 - zębra skierowane w przeciwną stronę, wariant 2 - zębra skierowane w tę samą stronę. Miarą trwałości badanej przekładni był wzrost temperatury, ciśnienia akustycznego i czas do zakończenia ustalonej liczby cykli badawczych lub awaria przekładni. Wyniki posłużą do opracowania nowych rozwiązań przekładni polimerowych.

III.11.1. Określenie warunków brzegowych dla przekładni zębatach wykonanych z niemodyfikowanych materiałów PA6 i PA66 oraz badania trwałości dla pozostałych wytypowanych tworzyw obejmowały:

- testy dla stałych prędkości i zmiennych momentów obrotowych (tab.23) - wyniki (rys.86 i rys.87) , następnie tab.24 - wyniki rys.88 i rys.89;
- testy dla zmiennych prędkości i zmiennych momentów obrotowych tab.25 - wyniki rys.90 i rys.91); następnie tab.26 - wyniki rys.92 i rys.93, a także następne - rys.94 - rys.98;
- kolejne testy były wykonane z parametrami wg tab.27, a wyniki zostały zestawione na rys.99 - rys.112.

Po serii wstępnych testów przekładni Autorka rozprawy sformułowała zalecenia odnośnie do możliwości zminimalizowania wystąpienia uszkodzeń obniżających trwałość polimerowych kół zębatach, przejawiających się:

- deformacją zębów z powodu topienia się warstwy wierzchniej zębów wskutek gwałtownego wzrostu temperatury;
- zużyciem powierzchniowym zębów w wyniku ścierania zewnętrznych warstw i tworzących się odprysków;
- wżerami na bocznej powierzchni zęba w wyniku zmęczenia materiału w warstwie przypowierzchniowej wskutek występujących, zmiennych naprężeń ścinających.

Na podstawie tych wniosków do dalszych badań Doktorantka wytypowała do dalszych badań trzy materiały charakteryzujące się najmniejszym zużyciem i najniższymi wartościami temperatury oraz ciśnienia akustycznego, tj.: PA66/6T/35GF, PA46, PA46/PTRFE.

III.11.2. Określenie wpływu wstępnego docierania korygującego na trwałość przekładni zostały przeprowadzone w układzie z kołem zębatach napędzanym, wykonanym z proszków metali w technologii spiekania DMLS (rys.113 i rys.114). Etapy docierania są pokazane na rys.115, a parametry etapu docierania w tab.28 oraz warunki realizacji testów w tab.29. Zestawienie wyników zostało ujęte w tab.30. Testy wykazały, że dla przekładni PA46, PA46/PTRFE zastosowanie docierania spowodowało obniżenie temperatury pracy przekładni i natężenia dźwięku. Natomiast przeciwny efekt wystąpił dla kół zębatach wzmocnionych włóknem szklanym (PA66/6T/35GF) wraz z wrywaniem materiału z pracującej powierzchni kół zębatach (rys.116). Dlatego z kolejnej serii badań trwałościowych koła z kompozytu PA66/6T/35GF zostały usunięte.

III.11.3. Testy trwałościowe przekładni z zastosowaniem hybrydowych kompozycji polimerowych zostały wykonane dla materiałów PA46 i PA46/PTRFE. Poszerzono je o nowe kompozyty PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM, zawierające nanorurki węglowe i środek smarny

oparty na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylenowych. Parametry stu przekładni przedstawia tab.31.

Wyniki testów zostały uwidocznione na rys.117 - rys.123. Wprowadzenie do struktury PA46 i PA46/PTFE nowych modyfikatorów, tj. wielościennych nanorurek i środka smarnego spowodowało znaczący wzrost trwałości kół zębatych wskutek wzrostu przewodnictwa cieplnego kompozytu oraz zmniejszenia tarcia współpracujących powierzchni zębów.

Przeprowadzone badania wykazały, że najlepszym kompozytem jest PA46/PTFE/CNT/SM.

III.12. Analiza geometrii zębów KZ25 i KZ17 po testach trwałościowych została wykonana dla trzech zębów spośród kół zębatych PA46, PA46/PTRFE, PA46/CNT/SM oraz PA46/PTFE/CNT/SM. Z uwagi na podobny obraz wyników zostały porównane powierzchnie reprezentatywnych zębów KZ25 i KZ17, które podczas testów były ustawione wg wariantu 1 lub wariantu 2. Mapy odchyłek współpracującej bocznej pary zostały przedstawione na rys.124 i rys.125. Koła zębate ułożone podczas testu trwałości w sposób kompensujący skurcz podlegały znacznie mniejszemu zużyciu powierzchni współpracującej zęba.

Podsumowanie i wnioski zostały obszernie omówione z jednoznacznym podkreśleniem, że: *„... badania dotyczące opracowania nowej grupy materiałów kompozytowych stosowanych w przemyśle automotive, ... pozwolą na przyspieszenie procesu dopracowania kół zębatych otrzymanych z innowacyjnych kompozycji polimerowych...”*.

Należy podkreślić, że sformułowane wnioski w pełni są wynikiem wykonanych przez mgr inż. Magdalenę Zajdel badań i analiz przedstawionych w ramach opiniowanej rozprawy doktorskiej.

2. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy, procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Magdalena Zajdel podjęła temat badawczy, ukierunkowany na opracowanie i przemysłowe zastosowania nowych materiałów kompozytowych. Przedstawiła spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu budowy i właściwości materiałów z grupy poliamidów. Zaproponowała metody ich modyfikacji ukierunkowane na zastosowania w przekładniach zębatych.

Stwierdzone nieliczne uwagi edytorskie, które przekazałem Doktorantce nie obniżają merytorycznej zawartości rozprawy doktorskiej.

Opiniowana rozprawa doktorska należy do dyscypliny „inżynieria mechaniczna”. Zawiera oryginalne cechy nowości i znaczące walory użytkowe, które poszerzają wiedzę w zakresie rozwoju i przemysłowych zastosowań materiałów kompozytowych w budowie maszyn, a w szczególności w przemyśle samochodowym.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Zajdel nt.: „Hybrydowe kompozyty polimerowe stosowane na elementy w branży automotive” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki ((ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

Proponuję również rozważyć wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Kraków, dnia 24 sierpnia 2023 r.


Józef Gawlik