

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamili Buziak
pt. „Modelowanie procesu wytłaczania jednoślimakowego
polimerowych kompozytów drzewnych”

Recenzja została opracowana na wniosek Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 7 września 2022 r., zgodnie z pismem Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego z dnia 15 września 2022 r.

Zakres rozprawy

Oceniana rozprawa doktorska liczy 134 strony. Składa się z 4 rozdziałów, poprzedzonych wstępem, oraz rozdziału zatytułowanego „Zakończenie”. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 131 pozycji. Zamieszczono ponadto streszczenie w języku polskim i angielskim.

W części wstępnej wskazano na duże zainteresowanie przemysłu polimerowymi kompozytami drzewnymi (WPC) oraz konieczność doskonalenia technologii ich przetwarzania, głównie metodą wytłaczania. W praktyce projektowanie procesów wytłaczania jest wspomagane symulacjami komputerowymi. Stwierdzono jednak, że dotychczas nie opracowano modelu wytłaczania polimerowych kompozytów drzewnych, charakteryzujących się odmiennym niż tradycyjne tworzywa polimerowe mechanizmem przepływu i uplastyczniania w tym procesie.

W rozdziale pierwszym Doktorantka przedstawiła krótko aktualny stan wiedzy z zakresu zagadnień rozpatrywanych w rozprawie. Opisała mechanizm uplastyczniania tworzywa w wyciarkarce jednoślimakowej oraz dotychczasowe osiągnięcia dotyczące modelowania matematycznego procesu wytłaczania tworzyw polimerowych. Wskazała na znaczące różnice w przetwórstwie polimerowych kompozytów drzewnych i klasycznych polimerów.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Sformułowanie problemu” przedstawiono tezy, cele oraz metodykę pracy.

Rozdział trzeci obejmuje opis badań eksperymentalnych procesu wytłaczania jednoślimakowego kompozytów wytworzonych na podstawie polipropylenu, przy

udziale wagowym włókien drzewnych w zakresie od 25 do 75%. Na podstawie tych badań zaproponowano model fizyczny uplastyczniania tworzywa: klasyczny model dwuwymiarowy charakterystyczny dla kompozytów o mniejszej zawartości napelniacza ($\leq 50\%$) oraz nowy model jednowymiarowy w przypadku dużej zawartości napelniacza ($\geq 50\%$).

W rozdziale 3.2 zamieszczono wyniki badań reologicznych kompozytów drzewnych. Celem badań, przeprowadzonych przy zastosowaniu reometru kapilarnego, była ocena wpływu składu kompozytów i warunków przetwórstwa (temperatury i szybkości ścinania) na ich lepkość, a także uzyskanie danych do opracowania modelu reologicznego oraz określenie zjawiska poślizgu przy przepływie. Podjęto również próbę wyznaczenia właściwości reologicznych kompozytu na podstawie pomiarów on-line, w warunkach produkcyjnych.

Rozdział czwarty jest poświęcony modelowaniu matematycznemu procesu wyłaczania jednoślimakowego kompozytów drzewnych. Na podstawie modeli transportu tworzywa stałego, modelu uplastyczniania tworzywa i modelu przepływu tworzywa uplastycznionego w wyłaczarce zbudowano globalny model procesu. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowych wyłaczania kompozytu z 50% zawartością napelniacza drzewnego. Na podstawie pomiarów ciśnienia w wyłaczarce i głowicy dokonano weryfikacji opracowanego modelu teoretycznego.

Końcową częścią pracy jest nienumerowany rozdział pt. „Zakończenie”, zawierający podsumowanie wykonanych badań eksperymentalnych i teoretycznych. Wskazane zostały kierunki dalszych prac w zakresie badania i modelowania procesu wyłaczania kompozytów drzewnych.

Spis literatury cytowanej w rozprawie obejmuje krajowe i zagraniczne artykuły naukowe oraz książki dobrane według zakresu rozprawy, materiały informacyjne producentów tworzyw. Dobór literatury oceniam jako wyczerpujący pod względem merytorycznym. Na podkreślenie zasługuje cytowanie 10 artykułów współautorstwa Doktorantki, opublikowanych w czasopismach indeksowanych w bazie JCR.

Treść pracy jest zgodna z jej tematem, rozdziały zostały prawidłowo zaplanowane. Praca jest zredagowana i opracowana bardzo starannie, wyniki badań i obliczeń zostały przedstawione na 106 rysunkach i w 6 tabelach.

Znaczenie tematyki rozprawy

Korzystne cechy konstrukcyjne i użytkowe kompozytów polimerowo-drzewnych, a także estetyczny wygląd elementów z nich wytwarzanych sprzyja coraz szerszemu wykorzystaniu tych materiałów, np. w budownictwie, architekturze ogrodowej, przemyśle motoryzacyjnym. Kompozyty WPC są materiałami uważanymi za proekologiczne dzięki zastosowaniu napelniacza pochodzenia naturalnego

i możliwości wykorzystania surowców pochodzących z recyklingu. Mogą być stosowane jako zamiennik drewna, zwłaszcza do wytwarzania przedmiotów użytkowanych w trudnych warunkach środowiskowych, przy zmiennych obciążeniach cieplnych, kontakcie z wodą, np. deski do budowy pomostów, tarasów, ławek. Przedmioty te są często kształtowane metodą wytłaczania, w której właściwości reologiczne tworzyw decydują o prawidłowym przebiegu procesu i w efekcie uzyskaniu wytworów o cechach spełniających wymagania użytkowników. Projektowanie procesów wytłaczania kompozytów WPC wymaga uwzględnienia wielu czynników determinujących właściwości kompozytów, takich jak rodzaj i zawartość napełniacza drzewnego, nierównomierność kształtu i wymiarów cząstek drewna, oddziaływanie między osnową i napełniaczem, warunki przepływu tworzywa w kanałach wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej. Do bardziej efektywnego projektowania procesu wytłaczania kompozytów WPC mogą przyczynić się symulacje komputerowe.

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy aktualnej i ciekawej problematyki związanej z doskonaleniem procesu wytłaczania wysoko napełnionych kompozytów polimerowych. Znajomość podstaw modelowania matematycznego procesu ich przetwarzania, opracowanie modelu fizycznego i matematycznego uplastyczniania kompozytu w wytłaczarce jednoślindakowej, opracowanie uniwersalnego modelu procesu wytłaczania stanowią znaczący wkład w rozwój wiedzy w zakresie badania przepływów i uplastyczniania wysoko napełnionych tworzyw polimerowych. Wyniki badań eksperymentalnych oraz opracowań teoretycznych mają również znaczenie użytkowe, stanowią cenną podstawę do doskonalenia procesów przetwórstwa kompozytów polimerowo-drzewnych. Znaczenie tematyki rozprawy potwierdza duże zainteresowanie publikacjami Doktorantki. Według bazy Scopus Jej prace były cytowane 107 razy (dane z 17.10.2022 r.)

Tezy badawcze i cele rozprawy

Sformułowano następujące tezy badawcze rozprawy:

1. Mechanizm przepływu polimerowych kompozytów drzewnych w wytłaczarce jednoślindakowej jest odmienny od mechanizmu przepływu klasycznych tworzyw polimerowych i w znaczący sposób zależy od składu kompozytu.
2. Uplastycznianie kompozytów drzewnych w wytłaczarce jednoślindakowej może zachodzić według różnych mechanizmów, klasycznego mechanizmu dwuwymiarowego lub jednowymiarowego, zależnie od składu kompozytu.
3. Podstawowe znaczenie przy modelowaniu przepływu ma odpowiedni model reologiczny kompozytów drzewnych.

Przedstawione tezy uważam za merytorycznie poprawne.

Jako cel poznawczy rozprawy przyjęto zbadanie mechanizmu przepływu i uplastyczniania kompozytów drzewnych w procesie wytaczania jednoślindakowego oraz opracowanie modelu fizycznego tych zjawisk, a ponadto wyznaczenie charakterystyki reologicznej badanych kompozytów. Dalszym celem pracy było opracowanie metodyki modelowania procesu wytłaczania jednoślindakowego kompozytów WPC i budowa globalnego modelu matematycznego tego procesu. Jako kolejny cel obrano weryfikację doświadczalną zaproponowanego modelu.

Osiągnięcie tak wyznaczonych celów rozprawy wymagało przeprowadzenia obszernych badań eksperymentalnych, wnikliwej analizy ich wyników oraz wykonania starannych rozważań teoretycznych z zakresu modelowania matematycznego procesu wytłaczania. Cele rozprawy zostały określone właściwie, są sformułowane w sposób jasny i zrozumiały.

Ocena merytoryczna rozprawy

W rozdziale „Aktualny stan wiedzy” Doktorantka wskazała na wykorzystanie badań eksperymentalnych oraz modeli fizycznych uplastyczniania do modelowania matematycznego procesu wytłaczania. Przedstawione zostały podstawowe cechy polimerowych kompozytów drzewnych, zawierających zazwyczaj kilkadziesiąt procent napełniacza drzewnego. Prawidłowe projektowanie procesu wytłaczania kompozytów WPC wymaga znajomości mechanizmu ich uplastyczniania i przepływu w układzie uplastyczniającym wytłaczarki i w głowicy. Stwierdzono, że dotychczas nie opracowano modelu wytłaczania polimerowych kompozytów drzewnych. Dostępne teorie nie dały podstaw do projektowania i przewidywania przebiegu procesu ich przetwarzania. Te stwierdzenia były podstawą podjęcia badań w zakresie modelowania procesu wytłaczania kompozytów WPC.

Badania doświadczalne, opisane w rozdziale trzecim, obejmowały analizę procesu wytłaczania jednoślindakowego kompozytów polimerowych o różnej zawartości napełniacza w postaci włókien drzewnych oraz ocenę właściwości reologicznych badanych materiałów. Kompozyty wytworzono na podstawie dwóch rodzajów polipropylenu, o zbliżonych właściwościach przetwórczych, wprowadzając do PP od 50 do 70% włókien drzewnych (kompozyty firmy Beologic) oraz 75% włókien (kompozyt firmy Rettenmaier&Söhne). Kompozyty o mniejszej zawartości napełniacza przygotowano we własnym zakresie.

Badania wytłaczania kompozytów realizowano na stanowisku zbudowanym na podstawie wytłaczarki jednoślindakowej, przy zmiennej prędkości obrotowej ślimaka wytłaczarki (20, 50 i 80 obr/min). Podczas badań mierzono masowe natężenie przepływu tworzywa, ciśnienie i temperaturę tworzywa w głowicy wytłaczarskiej oraz rozkład ciśnienia i temperatury wzdłuż cylindra układu uplastyczniającego. Do oceny sposobu przepływu i uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce zastosowano technikę

wyciągania ślimaka z cylindra wylączarki, po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu.

Wyniki badań przedstawione zostały oddzielnie dla kompozytów wytworzonych na podstawie dwóch rodzajów polipropylenu. Na przykładzie wyników uzyskanych dla kompozytów o zawartości napełniacza 25, 50 i 75% oraz nienapełnionego polipropylenu stwierdzono wzrost natężenia przepływu oraz ciśnienia tworzywa w głowicy wylączarskiej ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka. Z kolei większa zawartość napełniacza wpływa na zmniejszenie natężenia przepływu, wzrost ciśnienia wylączania i zmniejszenie efektu Barusa.

Ciekawe wyniki uzyskano w badaniach przepływu i uplastyczniania kompozytów drzewnych prowadzonych metodą wyciągania ślimaka z cylindra wylączarki. Na podstawie obrazów ślimaka wyciągniętego z wylączarki, próbek zdjętych ze ślimaka i ich przekrojów poprzecznych analizowano przebieg procesu uplastyczniania tworzywa w zależności od składu kompozytu oraz prędkości obrotowej ślimaka. W przypadku kompozytów o mniejszej zawartości napełniacza zaobserwowano typowy dla wylączania dwuwymiarowy mechanizm uplastyczniania tworzywa (mechanizm Tadmora CSM), charakteryzujący się stopniowym zmniejszaniem szerokości warstwy tworzywa stałego w kanale ślimaka. Natomiast uplastycznianie kompozytów zawierających 60 i 75 % włókien drzewnych przebiega w odmienny sposób, jednowymiarowy, od ścianki cylindra do rdzenia ślimaka. Uplastycznianie zachodzi na powierzchni rozdziału faz, ciała stałego i tworzywa uplastycznionego, poprzez zmniejszanie grubości warstwy tworzywa stałego wypełniającego kanał ślimaka. Stwierdzono ponadto, że ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka strefa uplastyczniania tworzywa przesuwa się w kierunku głowicy wylączarskiej, co tłumaczy się krótszym czasem nagrzewania, związanego z krótszym czasem przebywania tworzywa w cylindrze wylączarki.

Na podstawie tych obserwacji i analizy uzyskanych wyników badań przedstawiono model fizyczny przepływu i uplastyczniania polimerowych kompozytów drzewnych, klasyczny model dwuwymiarowy w przypadku kompozytów o mniejszej zawartości napełniacza ($WF \leq 50\%$) i nowy jednowymiarowy w przypadku kompozytów o dużej zawartości napełniacza ($WF \geq 50\%$).

Kolejnym etapem pracy były badania reologiczne kompozytów drzewnych. Obejmowały one wyznaczenie lepkości kompozytów, przy zastosowaniu reometru kapilarnego, w zakresach temperatury i szybkości ścinania, które odpowiadały warunkom badań doświadczalnych procesu wylączania. Badania potwierdziły nieniutonowskie, pseudoplastyczne właściwości reologiczne kompozytów, ich lepkość zmniejsza się ze wzrostem szybkości ścinania i temperatury. Wykazano wzrost lepkości tych materiałów ze wzrostem zawartości włókien drzewnych.

W celu uzyskania danych do opracowania modelu reologicznego tworzywa wykonano szersze badania kompozytu na osnowie polipropylenu Beologic zawierającego 50% napełniacza, charakteryzującego się najbardziej stabilnymi właściwościami przetwórczymi i reologicznymi. Wyznaczono parametry równania reologicznego Kleina. Wartościowym uzupełnieniem tej części rozprawy były próby oceny właściwości reologicznych kompozytu w warunkach produkcyjnych (on-line), przy zastosowaniu trzech wartości prędkości obrotowej ślimaka wylączarki. Badania te umożliwiły określenie parametrów równania potęgowego Ostwalda-de Waele'a, stałej konsystencji m oraz wykładnika płynięcia n .

Wyniki badań zjawiska poślizgu przy przepływie kompozytów drzewnych, wykonane z użyciem reometru kapilarnego, wskazują na występowanie poślizgu przy większych wartościach naprężenia stycznego. Wyznaczono krzywe lepkości kompozytu Beologic zawierającego 50% napełniacza. Omówione zostało również zagadnienie wpływu poprawek Rabinowitscha, Bagley'a i Mooney'a na przebieg krzywej lepkości w odniesieniu do krzywej niekorygowanej tymi poprawkami.

Dobrze zaplanowane i wykonane badania były podstawą modelowania procesu wylączania jednoślimakowego kompozytów drzewnych. Na podstawie zaproponowanego przez Doktorantkę modelu fizycznego opracowany został model matematyczny uplastyczniania i transportu tworzywa w stanie stałym oraz przepływu tworzywa uplastycznionego w układzie uplastyczniającym wylączarki i w głowicy wylączarskiej.

Starannie opisany sposób modelowania matematycznego procesów transportu, uplastyczniania oraz przepływu tworzywa w wylączarce był podstawą do opracowania globalnego modelu wylączania kompozytów drzewnych. Model ten umożliwia prognozowanie przebiegu procesu wylączania jednoślimakowego polimerowych kompozytów drzewnych na podstawie znajomości właściwości przetwarzanych materiałów, charakterystyki geometrycznej wylączarki i warunków technologicznych procesu wylączania.

Przedstawiono wyniki symulacji komputerowych wylączania kompozytu Beologic z 50% zawartością napełniacza drzewnego, z wykorzystaniem opracowanego modelu. Wykonano obliczenia przy zmiennej prędkości obrotowej ślimaka i zastosowaniu różnych modeli reologicznych tworzywa:

- Kleina, uzyskanego na podstawie badań reometrycznych, z korektą Rabinowitscha i Bagley'a,
- prawo potęgowe, na podstawie pomiarów on-line,
- Kleina, uzyskanego na podstawie badań reometrycznych, z korektą Rabinowitscha, Bagley'a i Mooney'a.

W obliczeniach zastosowano modele uplastyczniania dwuwymiarowego i jednowymiarowego. Pokazane zostały zmiany temperatury, ciśnienia, stopnia

uplastycznienia tworzywa w układzie uplastyczniającym i w głowicy wylączarskiej oraz zużycie mocy w wylączarce.

Wyniki weryfikacji badań symulacyjnych, przeprowadzonych przy zastosowaniu różnych modeli reologicznych, wykazały dobrą zgodność wyników pomiarów eksperymentalnych z wynikami symulacji w przypadku dwuwymiarowego modelu uplastycznienia tworzywa. Wyniki symulacji uzyskane z wykorzystaniem modelu jednowymiarowego różniły się od wartości wyznaczonych w doświadczeniach. Stwierdzono, że przy 50% zawartości napełniacza drzewnego w kompozycie obowiązuje model dwuwymiarowy.

Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza, szczegółowy i staranny opis modelowania matematycznego procesu wylączania jednoślimakowego kompozytów drzewnych oraz wyniki symulacji komputerowych były podstawą do sformułowania końcowych wniosków, potwierdzających słuszność przyjętych celów pracy i stanowiących wyczerpującą weryfikację tez rozprawy.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych przepływu i uplastycznienia kompozytów drzewnych w procesie wylączania oraz właściwości reologicznych tych materiałów, a także opracowane modele matematyczne i wykonane symulacje komputerowe wylączania są oryginalne i stanowią znaczący wkład w rozwój wiedzy o przetwarzaniu wysoko napełnionych kompozytów polimerowych. W dostępnej literaturze jest niewiele informacji o projektowaniu procesów przetwórstwa polimerowych kompozytów drzewnych, o właściwościach znacznie różniących się do tradycyjnych tworzyw polimerowych. Nie opracowano dotychczas modelu matematycznego wylączania takich kompozytów. Jest to praca o bardzo dużej wartości poznawczej. Ma również znaczenie użytkowe, opracowany model matematyczny może stanowić podstawę budowy komputerowego systemu wspomagania projektowania procesu wylączania jednoślimakowego.

Doktorantka wykazała się umiejętnością planowania i prowadzenia eksperymentu oraz bardzo dobrą znajomością zagadnień teoretycznych niezbędną do realizacji założonych celów, co świadczy o Jej dobrym przygotowaniu do dalszej samodzielnej pracy naukowej. Wspomniała o możliwości prowadzenia dalszych prac naukowych w zakresie badania właściwości reologicznych, struktury, stanu powierzchni wyrobów wylączanych z polimerowych kompozytów drzewnych oraz modelowania wylączania przy granicznej zawartości napełniacza drzewnego, zagadnień istotnych ze względów poznawczych oraz z uwagi na cele użytkowe.

Uwagi szczegółowe

Rozprawa jest napisana poprawnym językiem, rysunki są wykonane bardzo starannie. Do drobnych uwag można zaliczyć:

- str. 58, wzór (4.4) – brak wyjaśnienia symbolu f_w ,
- str. 89-91, tabele 1-3 – jednostką przewodności cieplnej w układzie SI jest $W/(m \cdot K)$, a ciepła właściwego $J/(kg \cdot K)$,
- str. 101, 111, 116, rys. 76, 77, 94, 95, 101 – niepełny opis na osi rzędnych.

Pozostałe uwagi:

- W p. 3.1.1. opisano skład badanych kompozytów – nie podano rodzaju (nazwy handlowej) włókien drzewnych zastosowanych do wytwarzania kompozytów.
- W badaniach eksperymentalnych wytlaczania kompozytów zastosowano jednakowe warunki prowadzenia procesu (str. 21). Czym kierowano się ustalając warunki wytlaczania takie same dla wszystkich kompozytów, znacznie różniących się właściwościami przetwórczymi?
- Na rys. 19-22, 25–26 pokazano przekroje poprzeczne próbek badanych kompozytów. Czy są to przekroje próbek uzyskanych z obszarów pomiędzy kolejnymi (którymi) zwojami ślimaka?
- Czy przeprowadzono symulacje komputerowe wytlaczania kompozytów o większej zawartości drewna np. 75% w celu weryfikacji modelu uplastyczniania jednowymiarowego?

Przedstawione uwagi nie wpływają na merytoryczną wartość rozprawy, którą oceniam bardzo wysoko.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa ma charakter oryginalnej pracy naukowej, zagadnienia poruszane w rozprawie są aktualne i niosą istotne cechy nowości naukowej. Uzyskane wyniki badań są wartościowe i stanowią znaczący wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a zwłaszcza w zakresie przetwórstwa kompozytów polimerowych. Doktorantka wykazała się odpowiednią wiedzą z zakresu badania właściwości polimerowych kompozytów drzewnych, ich przetwórstwa oraz modelowania numerycznego. Ma bardzo dobre przygotowanie do rozwiązywania postawionych problemów badawczych, prowadzenia badań naukowych, oceny wyników i formułowania wniosków. Wyniki badań i opracowany globalny model wytlaczania polimerowych kompozytów drzewnych mogą stanowić cenny materiał źródłowy do praktycznego wykorzystania przy budowie komputerowego systemu wspomaganego projektowania tego procesu. Na podkreślenie zasługuje fakt niezwykle starannego opracowania rozprawy.

W przypadku pozytywnych wyników dalszych etapów w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych, stawiam wniosek o wyróżnienie tej rozprawy i jej Autorki. Praca stanowi istotny wkład w rozwój przetwórstwa oraz modelowania numerycznego polimerowych kompozytów drzewnych. Na wyróżnienie zasługuje fakt opracowania nowego modelu fizycznego i matematycznego uplastyczniania kompozytu w wyciwarzce, dwuwymiarowego lub jednowymiarowego w zależności od zawartości napelnacza drzewnego w kompozycie. Zaproponowany model wyciwarzania ma charakter uniwersalny, umożliwia symulację wyciwarzania kompozytów drzewnych w różnych warunkach technologicznych procesu, przy różnych konfiguracjach geometrycznych ślimaków. Imponujący jest dotychczasowy dorobek publikacyjny Doktorantki. Jest ona współautorką dziesięciu cytowanych w rozprawie prac opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak Polymers, International Polymer Processing, Polimery.

Uważam, że recenzowana praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym. Przewód doktorski został otwarty w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, natomiast obecnie tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. W związku z powyższym stawiam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o przyjęcie rozprawy mgr inż. Kamili Buziak pt. „Modelowanie procesu wyciwarzania jednoślindakowego polimerowych kompozytów drzewnych” i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

E. Bouzga