

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Narowskiego „Nierównomierne
wypełnianie form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie”

Recenzję przygotowałem zgodnie z pismem WIP.480.15.2021 z dnia 12.07.2021 r. Dziekana Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego. Przewód doktorski obejmujący recenzowaną rozprawę otwarty został w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

Recenzowana rozprawa związana jest z problematyką technologii przetwórstwa, a ściślej technologii wtryskiwania, materiałów polimerowych. Poświęcona jest ważnemu w praktyce zjawisku nierównomiernego wypełniania form wielogniazdowych z identycznymi gniazdami mimo iż droga płynięcia do gniazd (długość i wymiary kanałów dopływowych) są takie same, tzn. przepływ jest geometrycznie zrównoważony. Efekt może istotnie pogarszać jakość wyrobów, np. gdy istnieją duże wymagania pod względem ich wyglądu i stabilności wymiarowej. Mimo iż to ważne technologicznie zjawisko znane jest od wielu lat jak dotąd nie doczekało się przekonującego wyjaśnienia i efektywnych metod jego eliminacji. Stąd też badania podjęte przez doktoranta są jak najbardziej aktualne i godne poparcia jednocząc w sobie zarówno elementy teorii jak i praktyki.

Oceniając rozprawę pod względem formy trzeba stwierdzić, że przygotowana jest ona w typowym dla wielu wydawnictw formacie A5 i liczy ok. 120 stron. Na początku zawiera streszczenia w języku polskim (2s) i angielskim (2s) oraz wstęp (4s). Właściwe rozważania podzielił autor na 6 rozdziałów: 1. Aktualny stan wiedzy (6s), 2. Sformułowanie problemu (2s), 3. Analiza konstrukcyjno-technologiczna zagadnienia (34s), 4. Analiza termoreologiczna zagadnienia (34s), 5. Badania optymalizacyjne (20s) oraz 6. Zakończenie (3s). Całość kończy spis literatury (8s). Jak wskazują powyższe tytuły rozdziałów praca nie zawiera typowego wyodrębnienia części doświadczalnej oraz dyskusji wyników. Widać natomiast, że doktorant podzielił wyniki prac własnych na trzy autonomiczne lecz powiązane ze sobą bloki, które zreferowane zostały w rozdziałach 3-5. W każdym z nich znajdują się zarówno elementy teoretyczne związane zasadniczo z komputerową symulacją przebiegu zapełniania formy wtryskowej jak i doświadczalne obejmujące praktyczne próby wtryskiwania w warunkach (np. temperatura stopu, szybkość wtrysku, geometria i temperatura formy, itp.) zgodnych z

warunkami symulacji. Tytuły rozdziałów 3-5 na ogół dość dobrze oddają istotę poruszanych problemów. Trzeba też zwrócić uwagę, że tytuły podrozdziałów w dwóch najobszerniejszych blokach 3 i 4 są niemal identyczne, a w pozostałych częściowo się powtarzają (zwłaszcza program badań, metodyka badań i wyniki badań), co może prowadzić do nieporozumień a zwłaszcza trudności ze znalezieniem konkretnych zagadnień w treści pracy. Jest to tym bardziej istotne, że praca zawiera bardzo dużą ilość danych faktograficznych, co dobrze świadczy o pracowitości i zaangażowaniu doktoranta. Tak więc w pracy doliczyłem się 14 tabel i aż 85 rysunków o różnym charakterze (zdjęcia, schematy, wykresy, itp.). Wiele z tych rysunków związanych zwłaszcza z wypełnieniem gniazd formy wtryskowej ma bardzo rozbudowaną strukturę (np. po kilka różnych przypadków a w każdym charakterystyka zapełnienia 8 gniazd formy), co utrudnia wizualne (jakościowe) porównania uzyskanych rezultatów. Nie wiem czy nie lepszym rozwiązaniem dla czytelności tekstu nie byłoby przesunięcie części rysunków do załącznika pozostawiając w tekście głównym najbardziej reprezentatywne i wzbogacając nieco komentarz słowny do poszczególnych przypadków. Nie wpływa to jednak na wartość merytoryczną, która zostanie oceniona w dalszej części recenzji. Praca zawiera 101 pozycji dobrze dobranej i aktualnej literatury, z których 6 powstało przy współudziale doktoranta. Prace te opublikowane w ostatnich kilku latach w renomowanych czasopiśmie związane są z tematyką rozprawy zawierając wiele przedstawionych w niej wyników. Jedną z pozycji bibliograficznych stanowi praca dyplomowa doktoranta (2013r.), której tytuł wskazuje, że problemy związane z zapełnianiem gniazd form wielokrotnych były przedmiotem jego zainteresowania jeszcze w okresie studiów magisterskich. Praca napisana jest dobrym i jasnym językiem bez większych błędów gramatycznych, ortograficznych oraz pisarskich (których przytaczać nie będę) z bardzo poprawnym nazewnictwem. Abstrahując od redakcyjnych uwag związanych z prezentacją wyników jest ona także starannie zredagowana pod względem wizualnym. W podsumowaniu strony formalnej rozprawy należy stwierdzić, że spełnia ona podstawowe wymagania stawiane pracom doktorskim.

Oceniając merytoryczną stronę rozprawy należy stwierdzić, że jej tytuł „Nierównomierne wypełnianie form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie” adekwatnie oddaje istotę zagadnień, którymi w pracy zajmował się doktorant. We wstępie pracy autor krótko lecz jasno scharakteryzował istotę problemu zaznaczając potencjalne przyczyny występowania zjawiska nierównomiernego wypełniania gniazd zrównoważonych geometrycznie. Wskazał też znane sposoby eliminacji tego efektu oraz ich ograniczenia. Pewne kontrowersje może tu budzić sformułowanie „podstawową przyczyną nierównomiernego wypełniania form wtryskowych jest nieliniowy rozkład prędkości tworzywa w kanałach doprowadzających...” .Z jednej

strony jest to prawdziwe, gdyż w kanałach tych (o nieruchomych ściankach) istnieje przepływ ciśnieniowy, który ma nieliniowy rozkład prędkości w przekroju niezależnie od charakteru płynącej cieczy (także newtonowskiej). Z drugiej strony nie tłumaczy to asymetrii przepływu w rozgałęzionych kanałach geometrycznie symetrycznych zakładając symetrię warunków wymiany ciepła na ściankach kanałów. Jak należy więc rozumieć powyższe sformułowanie o nieliniowym rozkładzie prędkości? Zagadnienia zasygnalizowane we wstępie zostały szerzej rozwinięte w omówieniu aktualnego stanu wiedzy. Jest on stosunkowo krótki lecz dobrze prezentuje rozwój badań w ostatnich 50 latach nad nierównomiernym wypełnianiem gniazd w formach zrównoważonych geometrycznie. Od strony teoretycznej autor poświęcił dużo uwagi wyeksponowaniu prezentowanych w literaturze nieraz bardzo złożonych sprzężeń pomiędzy szybkością wydzielania ciepła, szybkością ścinania, temperaturą, ciśnieniem i lepkością, które mogą wpływać na powstawanie asymetrii przepływu. Szkoda, że po macoszemu potraktował jeszcze jedno potencjalne, a moim zdaniem bardzo poważne źródło powstawania asymetrii przepływu, tzn. indukowanie przepływów wtórnych (chyba że literatura w aspekcie asymetrii wypełniania gniazd nic o tym nie wspomina). Do takich przepływów wtórnych należą np. wiry Deana (Dean vortices/eddies) prostopadłe do kierunku przepływu głównego i powstające przy zmianie kierunku przepływu wskutek efektów bezwładności i narożne wiry Moffatta (corner Moffatt eddies) występujące najczęściej przy zmianie przekroju kanału wzdłuż kierunku przepływu. Te ostatnie występują prawdopodobnie także w kanale ślimaka. Jako odpowiednik wirów Deana w przepływie wleczonym można traktować bardziej znane wiry Taylora. Wiry są źródłem niestabilności i mogą być intensyfikowane przez lepkość sprężystości cieczy. Tak więc w cieczach lepkość sprężystych może być indukowany prostopadły przepływ cyrkulacyjny nawet w kanałach prostych lecz o przekroju niekołowym, którego źródłem jest niezerowa druga różnica naprężeń normalnych. Literatura dotycząca przepływów wtórnych jest dosyć bogata. Wydaje się, że przepływy wtórne (zwłaszcza Deana) powinny ujawniać się w trakcie obliczeń symulacyjnych 3D opartych o równania ciągłości, ruchu, energii i konstytutywnego Crossa, które wykonywał autor. W programie symulacyjnym nie są one prawdopodobnie wyeksponowane, jednakże w kilku miejscach przy omawianiu wyników symulacji doktorant wspomina kilkakrotnie o obracaniu się strumienia w prawo lub w lewo, co jest najpewniej wynikiem istnienia przepływu wtórnego. O korzystnym wpływie członu bezwładnościowego w równaniu ruchu na rezultaty modelowania zjawiska nierównomiernego wypełniania form wspomina także autor w bardzo ciekawym podrozdziale 3.2 na temat badań symulacyjnych. W dalszym ciągu omówienia teoretycznego autor skoncentrował się na dyskutowanych w literaturze sposobach niwelowania efektu nierównomiernego wypełniania gniazd formy z

wyeksponowaniem korekty typu Melt Flipper związanej z przejściowym uniesieniem strugi, którą szeroko stosował w badaniach własnych. Omówił także prezentowany w literaturze wpływ parametrów wtrysku oraz charakterystyki tworzywa na efekt asymetrii wypełniania gniazd oraz niektóre wyniki badań symulacyjnych. Ten fragment rozprawy kończy autor trafną konkluzją, że mimo wielu prac problem jest daleki od jednoznacznego i uniwersalnego rozwiązania, co nie budzi zastrzeżeń. Trzeba podkreślić, że całość omówienia wskazuje na jego bardzo rzetelną, głęboką znajomość aktualnego stanu wiedzy w temacie rozprawy.

Przedstawiona w punktach problematyka badań obejmująca tezy pracy, cele pracy oraz metodykę pracy sformułowana została jasno i precyzyjnie, stąd także nie budzi zastrzeżeń.

Rozdział 3 - Analiza konstrukcyjno-technologiczna - poświęcił autor określeniu wpływu warunków płynięcia i chłodzenia tworzywa oraz konstrukcji układu wlewowego na efekt asymetrii wypełniania gniazd. Tą ostatnią oparł autor na wprowadzeniu trzech różnych systemów korekcyjnego przepływu w kanałach wlewowych (w tym Melt Flipper) oraz czwartego – nieskorygowanego - jako układu odniesienia. Pewna niejasność związana jest jedynie z przekrojem kanału. Schematyczne rysunki sugerują, że jest on kołowy, podczas gdy podane później rezultaty obliczeń symulacyjnych, że trapezoidalny (co jest chyba prawdą lecz nie jest wspomniane). Jest to istotne z uwagi na możliwość generowania niektórych cyrkulacyjnych przepływów wtórnych. Nieco komentarza wymagałyby też kryteria doboru parametrów wtryskiwania (prędkość, temperatura formy, rozkład temperatury cylindra), chociaż podane wielkości są dość typowe. Jako tworzywo wiodące doktorant zastosował PBT, słusznie nawiązując do innych badań z użyciem PBT opisanych w literaturze. Mógł jednak od razu wspomnieć, że w badaniach przedstawionych dalej używane były też inne materiały, tzn. mieszanina PBT/PC i ABS z krótkim wyjaśnieniem - dlaczego. Moim zdaniem podstawowa charakterystyka materiałów, urządzeń, metod pomiarowych, itp. powinna być w jednym miejscu, gdyż daje to lepszy pogląd na zakres badań. Parę słów komentarza, zwłaszcza w nawiązaniu do badań symulacyjnych, wymaga również użycie równania WLF do opisu zależności lepkości zerowej od temperatury. Jest ono prawdopodobnie elementem programu obliczeniowego i ma zapewnić adekwatny opis lepkości jako funkcji temperatury powyżej tzw. temperatury zaniku płynięcia (no-flow temperature) stosowanej często w obliczeniach modelowych przepływu w formach. W związku z tym mam pytanie czy ta wielkość była stosowana i jak kształtuje się dla poszczególnych materiałów oraz czy wpływ ciśnienia na lepkość zerową w równaniu WLF był uwzględniony a jeśli nie to dlaczego?

Jako kryterium nierównomierności wypełnienia gniazd stosowane konsekwentnie dalej przyjął doktorant zgodnie ze wskazówkami literaturowymi wielkość opartą o stosunek

średnich mas wyprasek z gniazd wewnętrznych i zewnętrznych. Wyniki bardzo rzetelnych pomiarów stopnia niejednorodności z użyciem wspomnianych wyżej systemów korekcji uzupełnione o analizę wymiarów kanałów nie są w pełni jednoznaczne, co może wskazywać, że badane zjawiska mają subtelny charakter zależąc od złożonych sprzężeń wielu parametrów procesu. Zdają się to potwierdzać wzorowo wykonane badania symulacyjne w warunkach odpowiadających warunkom doświadczalnym, z których już teraz wynika, że autor rozprawy jest doskonałym specjalistą od komputerowego modelowania procesów przetwarzania.

Należy przypuszczać, że niejednoznaczne wyniki poprzedniego etapu pracy skłoniły autora do bliższego przyjrzenia się wpływowi charakterystyki reologicznej materiału wyrażonej przez parametry równania Crossa, które stosowane było razem z równaniem WLF oraz charakterystyki termicznej, zwłaszcza dyfuzyjności cieplnej i współczynnika przejmowania ciepła, na nierównomierność wypełniania gniazd. Na tym etapie badań autor zastosował powierzchniowe a nie wspomniane już masowe kryterium równomierności wypełnienia gniazd oraz wprowadził dwa nowe wspomniane także materiały, tzn. PBT/PC oraz ABS. Rodzi się tu pytanie dlaczego stosowano inne kryterium równomierności oraz dlaczego nie użyto czystego PC, który jest amorficzny jak ABS ale ma wyższe temperatury przetwórstwa? W pierwszym etapie tego bloku badań doktorant bardzo systematycznie i dogłębnie ocenił od strony teoretycznej wpływ parametrów reologicznych i termicznych na asymetrię zapełniania gniazd formy z uwzględnieniem wspomnianych wcześniej metod korekty kształtu kanałów przepływowych w celu eliminacji efektu asymetrii zapełniania gniazd. Drugi etap badań w tym bloku związany był z porównaniem szerokich danych doświadczalnych uzyskanych dla trzech wspomnianych materiałów, którego realizację od strony metodycznej uznać należy za co najmniej poprawną. Ocenę rezultatów uzyskanych w tym bloku najtrafniej moim zdaniem podsumował sam autor pisząc między innymi (dokonałem pewnych skrótów): „Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że parametry reologiczne i termiczne silnie oddziałują na nierównomierność wypełnienia formy, przy czym to oddziaływanie zależy od stosowanego układu wlewowego oraz warunków przepływu tworzywa. Wobec złożonych zależności parametrów definiujących przepływ tworzywa i ich niejednoznacznego oddziaływania na nierównomierność wypełnienia zasadne jest twierdzenie, że niema możliwości sformułowania prostych i jednoznacznych zasad poprawnej konstrukcji układu wlewowego”. Jak widać wnioski płynące z tego etapu badań są nieco podobne do tych z etapu poprzedniego. Jak sądzę przyczyną jest złożoność układu, w którym występuje dużo czynników z osobna istotnych lecz często przeciwstawnych, tzn. wzajemnie się kompensujących, co daje niejednoznaczne efekty końcowe. Nie wynika to na pewno z braku umiejętności lub doświadczenia doktoranta

jako badacza, a wręcz przeciwnie. Świadczy o tym chociażby fakt, że w tej sytuacji podjął on ciekawą i nowatorską decyzję przeprowadzenia badań optymalizacyjnych z wykorzystaniem zarówno modelowania komputerowego jak i badań doświadczalnych. Ich celem miał być taki dobór warunków wtrysku aby zminimalizować asymetrię wypełnienia gniazd, co powinno umożliwić wyodrębnienie czynników praktycznie istotnych na tle szumu. Zagadnienia te autor omówił interesująco w trzecim i ostatnim bloku badań własnych, w którym wykorzystał i porównał pod względem efektywności kilka metod optymalizacji, tzn. metodę powierzchni odpowiedzi (RSM), metodę Taguchi oraz metodę uczenia maszynowego (BCA).

Na wstępie doktorant zdefiniował wielkości stanowiące kryteria optymalizacji. Oprócz stosowanej już wcześniej nierównomierności wypełnienia były to temperatura i czas wtrysku oraz temperatura powierzchni wypraski. Wielkości zostały znormalizowane i wprowadzone do kryterium globalnego (funkcji celu) o formie liniowej z odpowiednimi wagami. Jako parametry optymalizacji użyto temperaturę tworzywa i formy, prędkość wtrysku oraz typ układu wlewowego stosowane już wcześniej. Powstaje tu pytanie związane z kryteriami (oprócz pierwszego), tzn. na jakiej podstawie je wybrano i jak ustalono odpowiednie wagi? Wydaje się, że nieco obszerniejszy komentarz doktoranta w tym miejscu byłby korzystny dla jasności pracy. W dalszej części autor krótko lecz przystępnie scharakteryzował zastosowane metody optymalizacji przechodząc do najobszerniejszego fragmentu, tzn. wyników badań. Badania optymalizacyjne z wykorzystaniem podanych metod zostały wykonane w ścisłym sprzężeniu z danymi symulacji oraz doświadczalnymi. To złożone zadanie zostało wykonane przez autora z dużą znajomością rzeczy świadcząca o jego wysokim poziomie naukowym. Uwagą krytyczną (niemerytoryczną) jest to, że autor nie ułatwia postronnemu czytelnikowi, który nie musi dogłębnie znać różnych szczegółów, szybkiego i przekonującego zrozumienia omawianej problematyki w bloku związanym z optymalizacją. Wynika to z miejscami zbyt lakonicznego komentarza, który w założeniu ma stanowić jasny przewodnik po pracy, o czym już wcześniej wspominałem. Jest to ważne, gdy praca zawiera dużą ilość złożonych rysunków i tabel, stąd pewne ich omówienie byłoby korzystne dla jasności tekstu. Uzyskane wyniki optymalizacji parametrów według różnych metod wskazują, że optymalizacja parametrów według każdej z nich prowadzi do zmniejszenia nierównomierności zapełniania gniazd, mimo że parametry optymalne dla poszczególnych metod nieco się różnią. Bardzo pomocna do wyciągania wniosków jest tu zwłaszcza dobrze skonstruowana tabela zbiorcza 5.5. Trzeba się zgodzić z wnioskiem zawartym w pracy, że najbardziej efektywną jest metoda sztucznych sieci neuronowych BCA, gdyż prowadzi do największej wartości globalnej funkcji celu (teoretycznej i doświadczalnej). W praktyce może się to wyrażać faktem, że zmniejszenie

asymetrii przepływu podobne jak w innych metodach uzyskać można przy użyciu kanałów prostszych geometrycznie (z pojedynczą korektą typu Melt Flipper) prowadząc wtrysk z optymalną szybkością oraz przy optymalnej temperaturze formy i stopu wynikających z użytej metody optymalizacji. Nie znalazłem informacji dla jakiego polimeru wykonano doświadczenia (prawdopodobnie PBT?). Ponadto aby uzyskać całkowitą pewność odnośnie efektywności metody BCA w każdym przypadku trzeba by sprawdzić kilka dodatkowych materiałów, chociażby te używane w rozprawie, co z uwagi na bardzo duży zakres badań nie było chyba tu możliwe. Niezależnie od kilku uwag natury formalnej trzeba jednak stwierdzić, że również i ten fragment rozprawy poświęcony optymalizacji stoi na wysokim poziomie naukowym (merytorycznym). Można się pokusić o stwierdzenie, że autor wprowadza nową jakość do badań problemu asymetrii zapełniania gniazd formy wyrażającą się w bardzo ścisłym powiązaniu metod modelowania komputerowego, metod optymalizacji procesów oraz pomiarów doświadczalnych. Takie twórcze, ogólne podejście bardzo mi się podoba, gdyż pozwoliło na efektywne rozwiązanie postawionego zadania. Potwierdza to wysoką wartość merytoryczną pracy, mimo iż dokładny mechanizm powstawania asymetrii zapełniania gniazd nie jest jeszcze całkowicie jasny. Być może wspomniana przez autora próba stworzenia kompleksowego modelu przepływu przy wtryskiwaniu przyniesie nowe ciekawe rezultaty. Sądzę, że warto tu poświęcić nieco uwagi roli zjawisk lepkosprężystych, które nie były tu rozpatrywane prawdopodobnie jako mniej istotne, a przy tym trudne do ilościowego opisu. Tym niemniej warto wspomnieć, że literatura dotycząca przepływów cieczy polimerowych w kanałach typu T (T-shaped), tj. takich jak nieskorygowany system kanałów w rozprawie jest dość bogata i moim zdaniem interesująca.

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej fakty w podsumowaniu muszę ogólnie stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Narowskiego pt. „Nierównomierne wypełnianie form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie” prezentuje bardzo wysoki poziom naukowy przy stosunkowo niewielkich niedociągnięciach formalnych związanych z klarownością prezentacji wyników badań, które jednak nie umniejszają osiągnięć autora. Stąd moje uwagi w recenzji skierowane są niemal wyłącznie na sprawy niemerytoryczne. Ogólnie widać, że autor jest doskonałym specjalistą od zagadnień komputerowego modelowania procesów przetwarzania, czemu sprzyja nietuzinkowa znajomość informatyki, mechaniki przepływów i reologii. Do tego posiada dużą wiedzę z zakresu optymalizacji procesów technologicznych. Potrafi też twórczo podejść do kompleksowego rozwiązywania trudnych niejednoznacznych problemów uzyskując wymierne rezultaty, co warto podkreślić także o znaczeniu praktycznym, nawet w przypadku gdy mechanizm zjawisk nie jest do końca jasny.

O dużym potencjale naukowym i technologicznym doktoranta świadczy też jego naukowe CV z czasu realizacji pracy (znaczące publikacje, konferencje zagraniczne i krajowe, zagraniczne staże naukowe, działalność przemysłowa jako technolog lub konstruktor w kraju i za granicą). Ponieważ recenzowana rozprawa spełnia wymagania art. 13 ust. 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882) wnioskuję o skierowanie jej do dalszych etapów przewodu. Uwzględniając bardzo dobry poziom naukowy rozprawy, duży dorobek, aktywność oraz doświadczenie i umiejętności doktoranta zwracam się także z wnioskiem o jej wyróżnienie.

Ryszard G. Felber