Dr hab. inż. Piotr Pawełko
Instytut Technologii Mechanicznej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19
70-310 Szczecin

Szczecin 11.11.2015

Opinia o pracy doktorskiej pt." Konstrukcja i badania form wtryskowych nagrzewanych indukcyjnie" autorstwa mgr inż. Krzysztofa Mrozka.

Opinię opracowano na podstawie zlecenia Pana Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka z dnia 22.09.2015

1. Przedstawienie treści pracy

Bardzo zróżnicowane i wciąż rosnące wymagania rynkowe w stosunku do jakości produkowanych wyprasek z tworzyw sztucznych sprawiają, że ich dotychczasowe własności użytkowe są często niewystarczające na potrzeby obecnego rynku. Wypraski wymagają zatem stosowania w procesie ich produkcji coraz bardziej wysublimowanych rozwiązań technicznych. W grupie tej są m.in. rozwiązania dotyczące sterowaniem szybkimi zmianami temperatury gniazd formujących, które to wykorzystują obiegi olejowe, elektryczne grzałki oporowe, przegrzaną parę wodną, a także promienniki podczerwieni. Umożliwiają one na polepszenie własności użytkowych wyprasek, a czasem wręcz są warunkiem koniecznym umożliwiającym ich wytwarzanie. Warto przytoczyć fakt, iż do dnia dzisiejszego nie udało się opracować uniwersalnego sposobu modelowania form sprawdzającego się we wszystkich przypadkach. Każda z zastosowanych technologii wymaga, praktycznie każdorazowo, indywidualnego podejścia polegającego na analizie możliwości technicznych powiązanej z analizą opłacalności ekonomicznej, traktując nowoprojektowaną formę wtryskową jako prototyp. Na podstawie prowadzonych złożonych analiz oraz korzystając z doświadczenia

projektanta, podejmuje się decyzję o tym czy, i jaką technologię należy w konkretnym przypadku zastosować.

W pracy Autor skupił uwagę na zagadnieniach związanych z konstrukcją i badaniem form wtryskowych nagrzewanych selektywnie, a więc na najmniej obecnie rozpoznanej technologii formowania wtryskowego. Dodatkowo zaproponował realizację procesu nagrzewania selektywnego za pomocą grzałki indukcyjnej. Rozprawa doktorska Pana Krzysztofa Mrozka ogniskuje się wokół problematyki konstrukcji form wtryskowych do wyprasek cienkościennych. Lokuje to ją w nurcie najnowszych rozwiązań konstrukcyjnych form wtryskowych. Autor zaprezentował w pracy wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych zaprojektowanych przez siebie form wtryskowych wyposażonych w autorski układ selektywnego nagrzewania indukcyjnego.

Opiniowana praca doktorska zawiera 108 stron, w tym 95 cytowanych pozycji literaturowych (artykuły oraz książki), 8 patentów, 11 źródeł internetowych oraz 2 załączniki. Praca składa się z 7 rozdziałów, w tym wprowadzenia, wykazu oznaczeń, części zasadniczej i podsumowania. We wprowadzeniu Autor zakreślił problematykę związaną z technologią wytwarzania wyprasek z tworzyw sztucznych, ukierunkowując tematykę na problemy wytwarzania związane z produkcją elementów cienkościennych. Autor wytyczył cele pracy rozdzielając je na cele poznawcze i praktyczne. Do poznawczych zaliczył: wykrywanie powierzchni form o najwyższym ryzyku występowania wad, określenie wpływu selektywnego nagrzewania indukcyjnego tych powierzchni na parametry procesu wtrysku, określenie parametrów konstrukcji i sterowania generatora indukcyjnego przeznaczonego do selektywnego nagrzewania indukcyjnego. Jako cel praktyczny, podjął wyzwanie wdrożenia nowej technologii indukcyjnego nagrzewania form wtryskowych do produkcji złączy elektrotechnicznych i elektronicznych, w ramach współpracy z firmą Phoenix Contact Wielkopolska. Postawione cele są ambitne i wymagają rozwiązanie wielu trudnych problemów z zakresu modelowania i symulacji procesów wtrysku oraz prowadzenia badań doświadczalnych.

W rozdziale drugim Autor dogłębnie przedstawił zagadnienia związane z przetwórstwem tworzyw sztucznych, skupiając uwagę na technologii wtryskiwania. Przedstawił wady i zalety stosowanych dotychczas technologii oraz sklasyfikował wady wyprasek umożliwiając późniejszą ocenę wyprasek. Przytoczył za literaturą różne konstrukcje form wtryskowych, zastosowanych w nich systemów grzania i chłodzenia. W podsumowaniu stwierdził, że obecnie najintensywniej rozwijającą się technologią

dynamicznej zmiany temperatury form wtryskowych jest technika nagrzewania indukcyjnego.

Rozdział trzeci zawiera postawione tezy pracy w brzmieniu:

- lokalne nagrzewanie indukcyjne wnęki formującej pozwala na efektywne i energooszczędne prowadzenie procesu wtryskiwania z dynamicznymi zmianami temperatury formy wtryskowej,
- lokalne nagrzewanie indukcyjne wybranego obszaru wnęki formującej umożliwia eliminację linii łączenia płynących strug uplastycznionego tworzywa oraz powstawania typowych wad w wypraskach o grubości ścianki poniżej 0,5 mm.

W rozdziale czwartym rozprawy Autor dokonał wyboru 3-ech modeli wyprasek, predysponowanych do zastosowania techniki selektywnego nagrzewania indukcyjnego. Opracował założenia konstrukcyjne nowoprojektowanych form, przeprowadził analizy wtrysku w oprogramowaniu Autodesk Modflow. W kolejnym kroku skupił uwagę na problematyce związanej z nagrzewaniem indukcyjnym form, przedstawił konstrukcję i badania zespołu nagrzewania, analizował zagadnienia związane z doborem kształtu i lokalizacji cewek indukcyjnych. Opracował modele systemu nagrzewania i formy testowej w środowisku CAD, następnie przeprowadził symulacje procesu nagrzewania w środowisku MES -Nastran. Rozdział podsumowuje opis badań doświadczalnych zaprojektowanego i wykonanego układu korpus formy - układ selektywnego nagrzewania indukcyjnego, zrealizowany dla trzech wytypowanych postaci geometrycznych powierzchni form i dwóch typów cewek indukcyjnych.

W rozdziale piątym Autor zawarł opis realizacji części praktycznej rozprawy. Przedstawił szczegółowy opis rozwiązań konstrukcyjnych wykonanej formy wtryskowej z wkładami formującymi. Zaproponował i zrealizował system grzania selektywnego w postaci zainstalowanej na manipulatorze cewki indukcyjnej. Wykonany prototyp formy z systemem selektywnego nagrzewania indukcyjnego został użyty w badaniach doświadczalnych prowadzonych na przemysłowej wtryskarce Demag D35.

Wyniki badań doświadczalnych w zakresie optymalizacji parametrów technologicznych procesu, jego wydajności, jakości wtryskiwania zostały zamieszczone w rozdziale szóstym. Ocenę jakości wytwarzanych autor przeprowadził porównując wypraski wykonane w technologii konwencjonalnej oraz z wykorzystaniem nagrzewania indukcyjnego. Wypraski poddano testom mechanicznym oraz pomiarom na maszynie współrzędnościowej. Autor przedstawił także wyniki optymalizacji parametrów procesu

wtryskiwania ze względu na czas cyklu, przy założeniu zachowania jakości produkowanych wyprasek.

Rozprawę zakończono podsumowaniem, w którym Autor wyciągnął wnioski z przeprowadzonych badań oraz przedstawił wnioski dotyczące projektowania form do wyprasek cienkościennych z zastosowanym systemem grzania selektywnego.

Podany w pracy spis literatury jest przygotowany poprawnie, co świadczy o dobrej znajomości dziedziny, w której porusza się Autor. Drobny niedosyt budzi brak pozycji literaturowych z zakresu badań eksperymentalnych. Przestudiowanie tej literatury zapewne uchroniłoby Autora rozprawy od drobnych niedociągnięć jakie wkradły się w ocenie badań eksperymentalnych.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Bardzo poważnym atutem tej pracy jest jej utylitarność. Wyniki pracy mogą być bezpośrednio wykorzystane w praktyce przemysłowej przez krajowych i zagranicznych producentów wyprasek i form wtryskowych. Powstały w wyniku pracy prototyp formy wtryskowej z systemem selektywnego nagrzewania indukcyjnego, został wszechstronnie przebadany na drodze eksperymentów numerycznych oraz badań doświadczalnych. Autor wykazał dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnym środowiskiem do symulacji układów mechatronicznych oraz dużą znajomością zagadnień z zakresu technik modelowania. Autor nie stronił również od badań eksperymentalnych. Szeroki program badań doświadczalnych pozwolił na kompleksową ocenę parametrów zarówno samego systemu selektywnego grzania indukcyjnego jak i wyników jego implementacji w procesie formowania wyprasek cienkościennych. Zestawienie wyników tych badań zarówno z badaniami jak i danymi opisującymi klasyczną technologię podgrzewania form, pozwoliło porównać obydwa rozwiązania i wyciągnąć konstruktywne wnioski. Stały się one podstawą do sformułowania zaleceń konstrukcyjnych szczególnie dla potrzeb projektowania form służących wytwarzaniu cienkościennych wyprasek małogabarytowych. Realizując tak obszerny program badań doświadczalnych z zastosowaniem nowoczesnych technik pomiarowych, Autor wykazał się wiedzą i znajomością zagadnień prowadzenia eksperymentów. Zastosowane w pracy narzędzia badawcze są nowoczesne i adekwatne do rozważanej problematyki. Wszystkie zaplanowane zadania badawcze Autor zrealizował konsekwentnie, a uzyskane rezultaty poddał analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Zrealizowany przez Autora kompleksowy zestaw badań symulacyjnych procesu wtrysku z uwzględnieniem selektywnego nagrzewania wytypowanych obszarów. Wyniki tych badań prezentowane w postaci rozkładów ciśnienia w gnieździe formującym oraz rozkładów pól temperatur pod wpływem działania cewki indukcyjnej, pozwalają racjonalnie kształtować parametry procesu wtrysku i regulacji zastosowanego systemu selektywnego nagrzewania powierzchni. Ze względu na wysoki poziom innowacyjności rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystujących ten rodzaj nagrzewania, nie spotyka się jeszcze w literaturze tego typu kompletnych opracowań.
2. Zaproponowany i zrealizowany przez Autora zestaw badań eksperymentalnych, których celem była ocena zarówno parametrów eksploatacyjnych rzeczywistej, prototypowej konstrukcji systemu indukcyjnego nagrzewania selektywnego, jak i implementacja go do formy wtryskowej. Badania eksperymentalne objęły zarówno technologię konwencjonalną (izotermiczną) wtrysku jak również zmodyfikowaną z zastosowaniem selektywnego nagrzewania formy. Tak kompleksowe podejście pozwoliło przeprowadzić pełną ocenę zaproponowanego rozwiązania.
3. Opracowanie przez Autora innowacyjnej konstrukcji formy z systemem selektywnego nagrzewania indukcyjnego oraz układu dynamicznego nagrzewania indukcyjnego wybranych powierzchni formy zostały zgłoszone do opatentowania, co świadczy o nowatorskim podejściu do analizowanego zagadnienia.

Wyniki pracy wskazują na bardzo dobrą znajomość, przez Autora problematyki projektowania form wtryskowych, modelowania konstrukcji mechanicznych oraz modelowania procesów formowania wtryskowego.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Na str.14 Autor napisał: "Prędkość ścinania jest uzależniona od prędkości wtrysku i może być regulowana przez technologa lub operatora maszyny", nie wyjaśniając

tego zjawiska. Jaka jest zależność opisująca to zjawisko i jakimi parametrami maszyny można to regulować?

2. Na str.23 podana jest wartość średnicy kanałów grzejnych (10mm). Przy braku informacji o pozostałej geometrii (długości, kształtów) układu, informacji o parametrach źródła przepływu (ciśnienia), przytaczanie tej wartości wydaje się bezcelowe.
3. Nie bardzo rozumiem idę zamieszczenia rys.4.6, skoro w takiej postaci widać, że nawet przy zastosowaniu nagrzewania selektywnego, nie uda się uformować poprawnie wypraski.
4. Na str.55 podano zależność B<0,5T określającą poprawność działania modelu. Jak interpretować (wg. wykazu oznaczeń) zależność strumienia magnetycznego (B) od temperatury (T) i w jakich jednostkach należy je wówczas podawać?
5. Rys. 4.33. Jakim kryterium kierował się Autor dokonując dyskretyzacji elementami skończonymi model geometryczny? Czy analizowany był wpływ np. wielkości elementów na wyniki prowadzonych analiz? Na zamieszczonym rysunku nie można dostrzec opisanego gradientu długości odcinków w materiale cewki, jej systemie stabilizacji temperatury i koncentratorze.
6. Na str.93 Autor bardzo zdawkowo opisał przeprowadzoną ocenę wyprasek. Zawarł informację o użyciu do tego procesu maszyny współrzędnościowej oraz poddaniu wyprasek testom mechanicznym. Nie opisał kryterium ich oceny, umożliwiające przeprowadzenie subiektywnej, ilościowej oceny. Zawarty opis tyczy się jedynie oceny organoleptycznej. Jakim pomiarom został poddawane wypraski, jaki był rozrzut mierzonych wartości?
7. W pkt. 6.4 opis optymalizacji parametrów procesu wtryskiwania dotyczy jedynie skrócenia czasu trwania cyklu, a więc opracowania cyklogramu pracy. Autor nie odniósł się do parametrów procesu wtryskiwania. Czy były modyfikowane inne parametry procesu?
8. Określony w pkt.3 zakres pracy dotyczył m.in. doboru i optymalizacji parametrów nagrzewania nowych form wtryskowych pod kątem efektywności i energooszczędności procesu. Jak została przeanalizowana energooszczędność procesu z zastosowaniem selektywnego indukcyjnego nagrzewania form?

Na szczególne wyróżnienie zasługuje duża staranność redakcyjna recenzowanej rozprawy. Zamieszczane wykresy i fotografie są czytelne i dobrze ilustrują opisywane

zagadnienia. W trakcie czytania pracy udało mi się znaleźć tylko nieliczne błędy redakcyjne:

- Na str.7 wykaz oznaczeń użyto złej odmiany słowa "powierzchnia".
- Na str.14 użyto wielkości α, która nie jest zdefiniowana w wykazie oznaczeń.
- Na str.56 użyto wielkości C_{SE}, α, β, które nie są zdefiniowane w wykazie oznaczeń.
- W podpisie rys.2.21 widnieje" .. wtryskowej przy użyciu wody oraz pary wodnej", a z opisu winno być: "... wtryskowej: a) przy użyciu pary wodnej, b) grzałki elektrycznej".
- W tabelach 4.1, 4.2, 4.3 użyto opisu "Nagrzewanie indukcyjne", z opisu rozdziału wynika, że winno być "Nagrzewanie selektywne", ponieważ chodzi o grzanie wybranego obszaru a nie o techniczną realizację podgrzewania.
- Na str.54 wzór (4.7) odnosi się bezpośrednio do prawa Ohma, a nie Joul'a.
- Na str.54 we wzorze (4.8) autor posłużył się oznaczeniem konduktywności (σ), a w poprzedzającym go opisie używa jej odwrotności, czyli rezystywności (ρ).
- Na str.60 wzór (4.17) dotyczy prawa Gaussa (wyprowadzony jest z prawa Coulomba).
- Na str.60 rys 4.31, str.61 tabela 4.17 pojawia się oznaczenie materiału Fluxtrol A, a dopiero na str.67 jest wyjaśnienie, że jest to materiał magnetycznie miękki - zastosowany jako koncentrator pola.
- Na str.73 użyto oznaczenia system regulacji temperatury PSG. Brak jest wyjaśnienia, że PSG to firma (Plastic Service Group) dostarczająca m.in. systemy regulacji temperatury. Autor nie podał modelu tego urządzenia, tym samym powinien opuścić także oznaczenie PSG.
- Na rys. 4.56 widnieje podpis "Schemat stanowiska badawczego", a zamieszczone ilustracje nie zawierają schematu, a widok stanowiska podczas badań.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy, uważam, że w pełni spełnia ona wymagane stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym, ponieważ stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu

naukowego oraz wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej Autora pracy. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.

dr hab. inż. Piotr Pawełko