

Krzysztof SMYKSY¹

WYBRANE ASPEKTY MODELOWANIA PRACY STRUMIENIOWYCH MASZYN FORMIERSKICH O MAŁEJ DYNAMICE DZIAŁANIA

1. WSTĘP

Bezpośrednie zagęszczanie masy formierskiej strumieniem powietrza jest obecnie podstawową metodą wstępnego zgęszczania stosowanego w nowoczesnych maszynach do formowania skrzynkowego. W krajowych odlewniach pracuje wiele maszyn formierskich realizujących proces strumieniowy o stosunkowo małej dynamice (proces Seiatsu wprowadzony przez firmę Sintokogio). Szybkość narastania ciśnienia powietrza nad zagęszczaną masą jest rzędu kilku MPa/s. Ich zalety to: bardzo dobre efekty technologiczne, cicha praca, duża wydajność oraz prosta konstrukcja zaworu strumieniowego. W artykule przedstawiono wybrane aspekty modelowania procesów przepływu powietrza w przestrzeniach maszyny strumieniowej. Wyniki symulacji porównano z wynikami badań przeprowadzonych na prototypowym stanowisku formowania strumieniowego.

2. MODEL PRZEPŁYWU POWIETRZA W MASZYNACH STRUMIENIOWYCH O MAŁEJ DYNAMICE PRZEPŁYWU

Przy mniejszej dynamice procesu przepływu powietrza uzasadnione jest pominięcie zjawisk związanych z występowaniem słabych fal uderzeniowych [15] i wykorzystanie teorii przepływu quasi ustalonego, stosowanej w analizie pracy różnorodnych elementów i układów pneumatycznych [3,4,8, 17]. Ze względu na konstrukcję i strukturę maszyn realizujących proces Seiatsu – stosunkowo długie odcinki przewodów rurowych pomiędzy zbiornikiem wyrównawczym a zaworem strumieniowym, w analizie przepływów możliwe jest wykorzystanie modeli o parametrach rozłożonych [8] lub uproszczonych modeli o parametrach skupionych. Możliwe jest też stworzenie modeli stanowiących kombinację wyżej wymienionych. W drugim przypadku podstawowe znaczenie ma weryfikacja wyników symulacji i określenie wartości wykorzystywanych w obliczeniach współczynników charakteryzujących opory przepływu w elementach instalacji. W maszynach realizujących proces Seiatsu (formierki firmy HWS) występują dwie podstawowe przestrzenie: zbiornik wyrównawczy oraz przestrzeń za zaworem strumieniowym połączona bezpośrednio z przestrzenią technologiczną (obejmującą skrzynię formierską i nadstawkę).

¹ dr inż. , - Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych, Wydział Odlewnictwa AGH

W modelach o parametrach skupionych do opisu zmian parametrów powietrza w przestrzeniach maszyny strumieniowej można wykorzystać układ zwyczajnych równań różniczkowych, opisujących zmiany ciśnienia i temperatury powietrza:

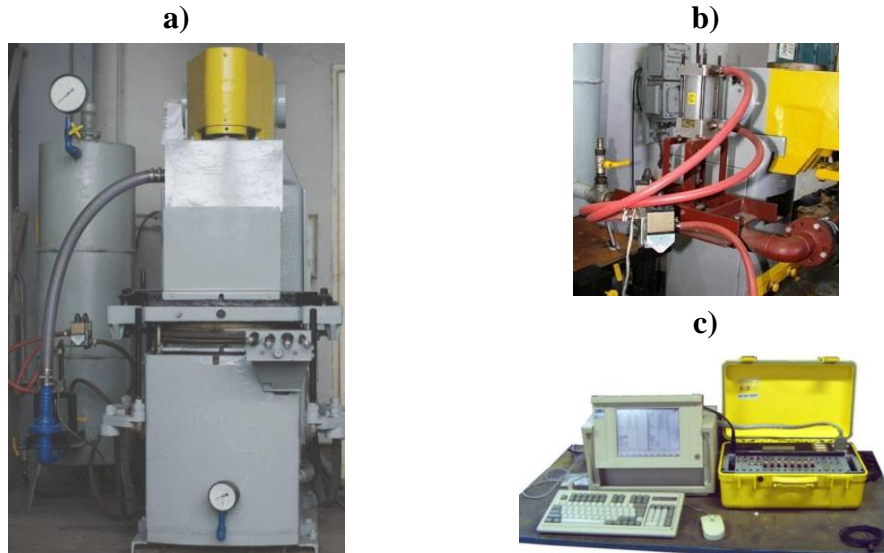
$$\kappa R \left(\sum_{k=1}^n T_{i,k} dm_{i,k} - \sum_{l=1}^m T_{j,l} dm_{j,l} \right) = V_j dp_j + \kappa p_j dV_j \quad (1)$$

$$R \left[m_j dT_j + T_j \left(\sum_{k=1}^n dm_{i,k} - \sum_{l=1}^m dm_{j,l} \right) \right] = V_j dp_j + p_j dV_j \quad (2)$$

w których: κ - wykładnik adiabaty, R - stała gazowa, p_j - ciśnienie, V_j - objętość analizowanej przestrzeni, $T_{j,k}$ - temperatura powietrza dopływającego ze źródła k do przestrzeni j , T_j - temperatura w przestrzeni j , dm_i , dm_j - przyrost masy powietrza w analizowanej przestrzeni związany z dopływem lub odpływem powietrza.

Zmiany masy powietrza – dm w analizowanej przestrzeni związane z dopływem lub odpływem (w czasie $d\tau$) można wyrazić równaniem (3) wykorzystującym chwilowe masowe natężenie strumienia $G_{i(j)}$ -wyliczone z ogólnie znanego równania Saint-Venanta, uwzględniającego wpływ czynnika w zakresie nadkrytycznym i podkrytycznym [4,8,18]. Istotny jest prawidłowy dobór „zastępczych” wartości współczynników wypływu uwzględniających opory przepływu (liniowe i miejscowe) w przewodach rurowych i zaworze strumieniowym.

W analizowanym przypadku – maszyny formierskiej realizującej proces Seiatsu, otrzymamy układ czterech równań dla dwóch podstawowych przestrzeni, uzupełnionych równaniami ruchu elementów zaworu strumieniowego.



Rys. 1. Widok stanowisk badawczych oraz aparatury: a- prototypowa formierka strumieniowa (adaptacja maszyny FKT 65), b- zespół zaworu strumieniowego (adaptacja maszyny FKT 54), c- wielokanałowy system pomiarowy

Wymagana jest wówczas znajomość charakterystyki statycznej zaworu oraz masa jego elementów ruchomych [17]. Ponieważ zawory maszyn strumieniowych o małej dynamice (proces Seiatsu) mają w stosunku do zaworów impulsowych prostszą konstrukcję [1,2,5], modelowanie ich pracy jest więc łatwiejsze. Możliwe jest też dalsze uproszczenie modeli polegające na zastąpieniu równania ruchu elementów zaworu równaniem zlinearyzowanym ujmującym podstawowe parametry zaworu (średnia prędkość przemieszczania zawieradła,

parametry charakterystyki statycznej) oraz przyjęcie konkretnych założeń związanych z przemianą gazu (powietrza) [18] w przestrzeniach formierki. W zależności od celu modelowania przedstawione powyżej równania można uzupełnić równaniami, uwzględniającymi proces zagęszczania i filtracji powietrza. Podczas strumieniowego zagęszczania zachodzą zmiany objętości wolnej przestrzeni nad masą formierską, a część powietrza przepływa w głąb masy (występują przy tym zmienne opory przepływu związane ze zmianą struktury ośrodka porowatego- masy formierskiej) i przez odpowietrzenia do atmosfery. Modelowanie procesów przepływu zachodzących w przestrzeni technologicznej, nawet w przypadku maszyn strumieniowych o małej dynamice, jest zagadnieniem złożonym. Modele procesu zagęszczania strumieniowego prezentowane w literaturze źródłowej zawierają dużo założeń upraszczających oraz nieprecyzyjnie określone stałe. Współczynniki występujące w równaniach są często zależnościami funkcyjnymi innych wielkości zmiennych w procesie. W literaturze można spotkać zarówno modele o stałych skupionych jak i rozłożonych [1,7,8,10,11]. Podstawą weryfikacji modeli są jednak nadal badania eksperymentalne [1,3,5,7,11,13].

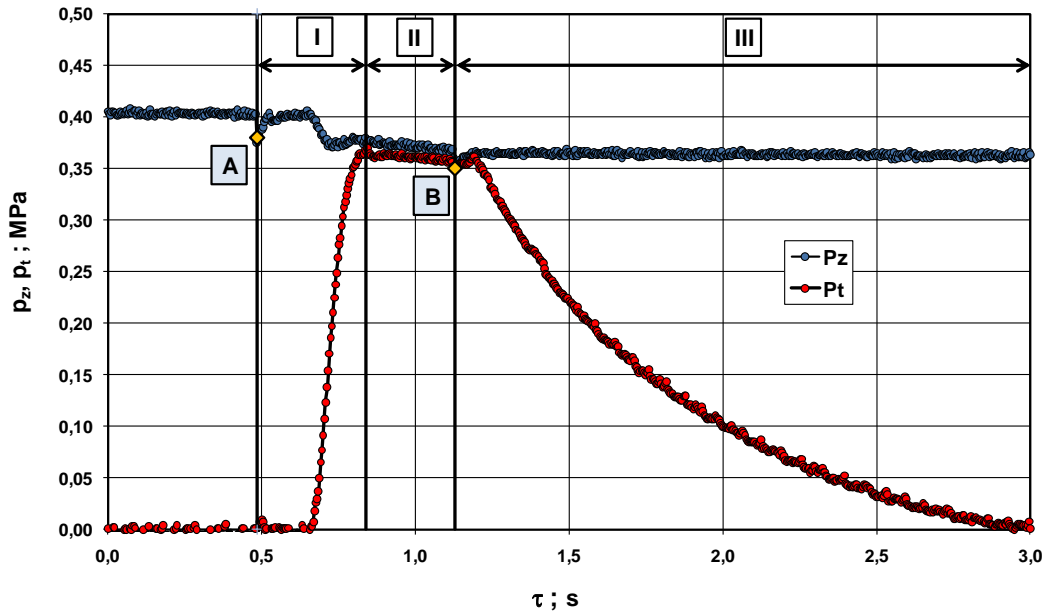
W analizie działania i ocenie zaworów maszyn strumieniowych oraz doborze parametrów podstawowych formierki (objętości przestrzeni, wymiary zaworu i.t.p) można wykorzystać model obliczeniowym oparty na przedstawionych równaniach, zakładając stałą objętość przestrzeni technologicznej (obejmującą objętość skrzyni formierskiej oraz przestrzeni dodatkowej) z uwzględnieniem przepływu powietrza z tej przestrzeni do atmosfery przez dysze odpowietrzające.

Na bazie opisanych układów równań przeprowadzono modelowanie procesu przepływu powietrza (w oparciu o pakiet MATLAB- Simulink). Wyniki symulacji porównano z pomiarami przeprowadzonymi na stanowiskach doświadczalnych realizujących zróżnicowane warianty procesów formowania strumieniowego.

3. WYNIKI POMIARÓW I SYMULACJI PRZEPIYU POWIETRZA W MASZYNE STRUMIENIOWEJ

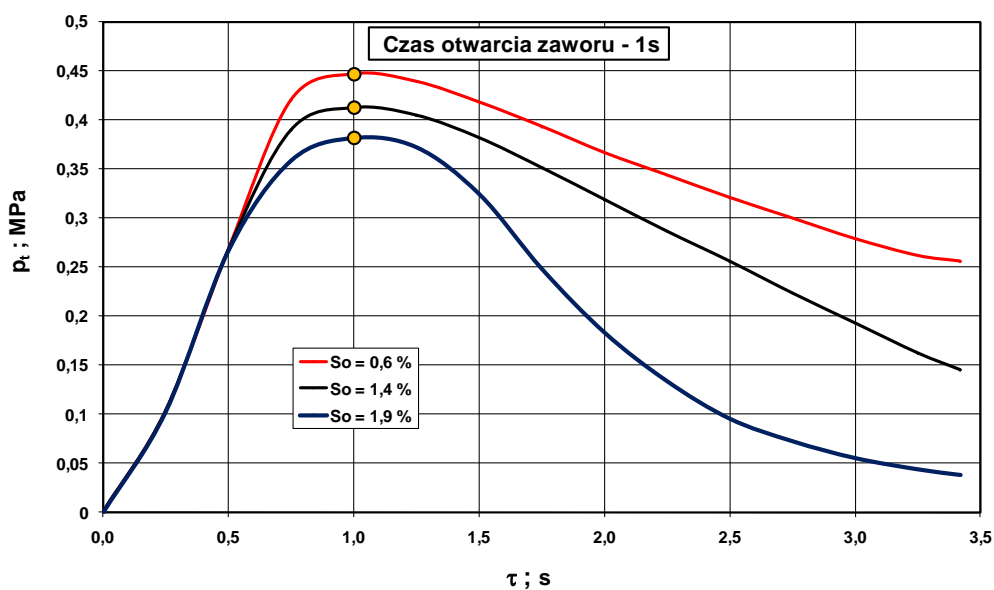
Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów ciśnienia w podstawowych przestrzeniach formierki strumieniowej (rys. 1b). W działaniu maszyny można wyróżnić trzy fazy, których czas trwania uwarunkowany jest parametrami konstrukcyjnymi, parametrami pracy formierki a także parametrami technologicznymi. Początek pierwszej fazy (I) inicjuje sygnał sterujący zaworem strumieniowym (punkt A), moment czasowy rozpoczęcia procesu przepływu uzależniony jest od parametrów konstrukcji zaworu oraz doboru parametrów jego działania. Koniec pierwszej fazy następuje po osiągnięciu maksymalnej wartości ciśnienia w przestrzeni technologicznej. Faza druga (II) trwa do momentu podania sygnału przesterowania zaworu strumieniowego (punkt B). Faza trzecia (III) obejmuje czas niezbędny do obniżenia wartości ciśnienia w przestrzeni technologicznej do wartości ciśnienia atmosferycznego. Podczas pomiarów maszyn strumieniowych momenty czasowe w punktach A i B mogą być precyzyjnie określone a opóźnienie czasowe pomiędzy współrzędną czasu dla punktu A oraz początkiem napełniania przestrzeni technologicznej daje dodatkową informację o funkcjonowaniu zaworu strumieniowego (dotyczy to również punktu B i momentu rozpoczęcia opróżniania przestrzeni technologicznej) . Przedstawiony powyżej podział ma charakter umowny, z punktu widzenia samych procesów przepływowych jako początek fazy I można przyjąć początek narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej. Faza II obejmuje wówczas proces równoczesnego zmniejszania ciśnienia w przestrzeni technologicznej i w zbiorniku wyrównawczym, a faza III - zmniejszanie ciśnienia jedynie w przestrzeni technologicznej (przy zamkniętym zaworze) spowodowane wpływem powietrza do atmosfery. W zależności

od sterowania zaworem strumieniowym (czas jego otwarcia) możliwe jest przesunięcie punktu B przed punkt czasowy możliwego do osiągnięcia w danych warunkach maksimum ciśnienia w przestrzeni technologicznej (w którym następuje zrównanie wartości ciśnienia w zbiorniku wyrównawczym i przestrzeni technologicznej) – faza II wówczas nie wystąpi. Zastosowanie tego wariantu działania maszyny, jeżeli nie prowadzi do pogorszenia efektów technologicznych zagęszczania, ma istotne znaczenie z punktu widzenia energochłonności procesu.



Rys.2. Przykładowe wyniki pomiarów ciśnienia w zbiorniku wyrównawczym- p_z oraz przestrzeni technologicznej- p_t prototypowej formierki strumieniowej

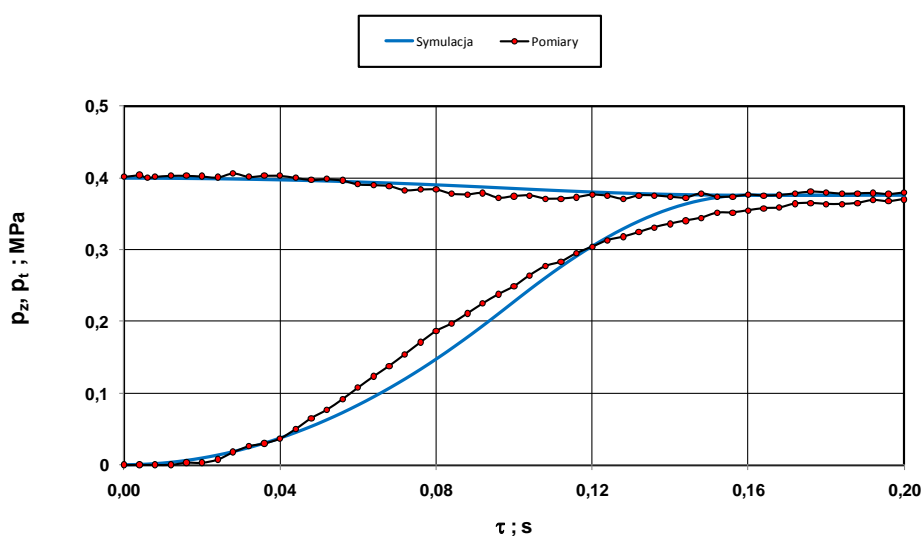
Rysunek 3 przedstawia wyniki pomiarów [6] wykazujące stosunkowo niewielki wpływ stopnia odpowietrzenia przestrzeni technologicznej (stosunek powierzchni odpowietrzeń do powierzchni płyty modelowej) na szybkość narastania ciśnienia w I fazie. Wpływ ten jest istotny na przebieg III fazy procesu przepływu powietrza.



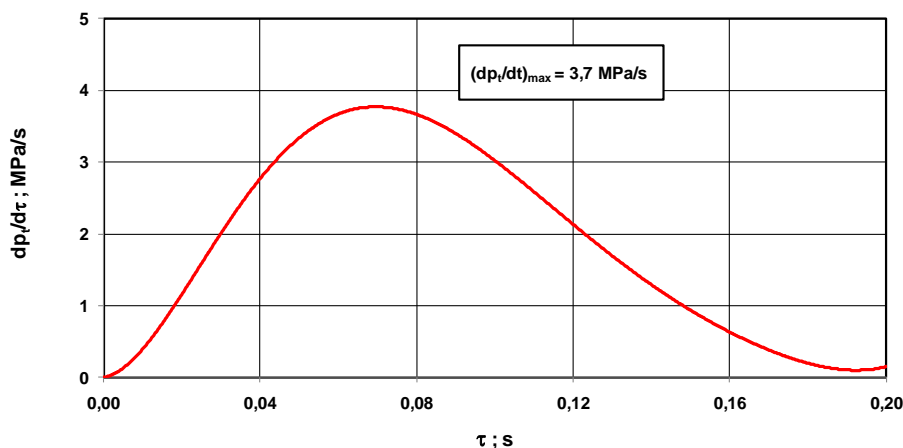
Rys.3. Zmiana ciśnienia- p_t w przestrzeni technologicznej- proces Seiatsu [6] przy różnych stopniach odpowietrzenia- S_o

O przebiegu procesu napełniania przestrzeni technologicznej nad masą decydują głównie parametry konstrukcji i parametry działania formierki. Symulacja procesu przepływu może ułatwić analizę wpływu tych parametrów na przebieg procesu przepływu powietrza w przestrzeniach maszyny. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji (opartej o model uproszczony o parametrach skupionych) i pomiarów procesu przepływu. Uwzględniając wpływ szeregu parametrów na wyniki symulacji i określoną jej dokładność (jak również dokładność pomiarów) zgodność przebiegów należy uznać za dobrą i wystarczającą dla celów wspomnianej analizy.

a)



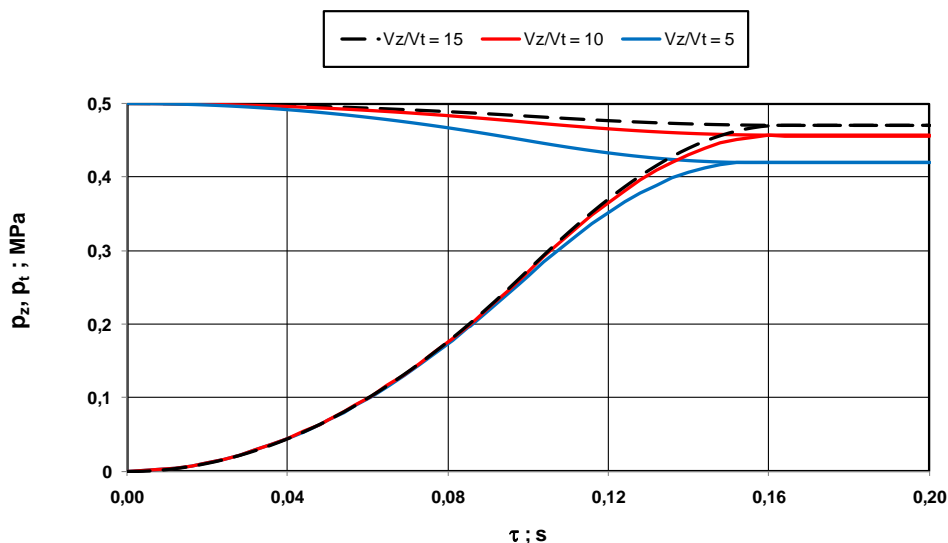
b)



Rys.4. Porównanie wyników symulacji i pomiarów podczas I fazy pracy formierki strumieniowej- **a** oraz czasowy przebieg zmian szybkości narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej- **b**

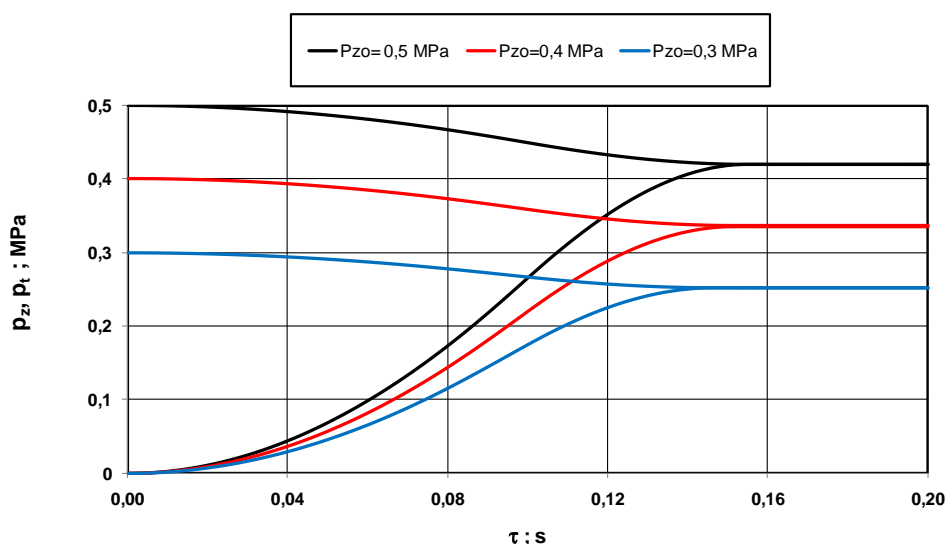
Osiągnięta w przestrzeni technologicznej wartość szybkości narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej (rys.1b) jest wyższa od wartości tego parametru, który można oszacować na podstawie przebiegu z rysunku 3 (według danych źródłowych [6]). Wynikać to może z innych relacji objętości zbiornika wyrównawczego do objętości przestrzeni technologicznej oraz parametrów zaworu strumieniowego.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji ukazujące wpływ parametrów konstrukcyjnych (stosunek objętości zbiornika wyrównawczego do objętości przestrzeni technologicznej) oraz działania formierki (wartość ciśnienia początkowego w zbiorniku wyrównawczym) na dynamikę przebiegu pierwszej fazy procesu przepływu.



Rys.5. Przykładowe wyniki symulacji I fazy działania maszyny strumieniowej przy zmiennym stosunku objętości zbiornika wyrównawczego- V_z do objętości przestrzeni technologicznej- V_t ; p_z - nadciśnienie w zbiorniku wyrównawczym, p_t - nadciśnienie w przestrzeni technologicznej

Podobnie jak w przypadku symulacji pracy maszyn impulsowych [12, 16] widoczna jest przydatność modelowania w określeniu wpływu stosunku V_z/V_t na dynamikę przebiegu procesu napełniania przestrzeni technologicznej (rys. 5).

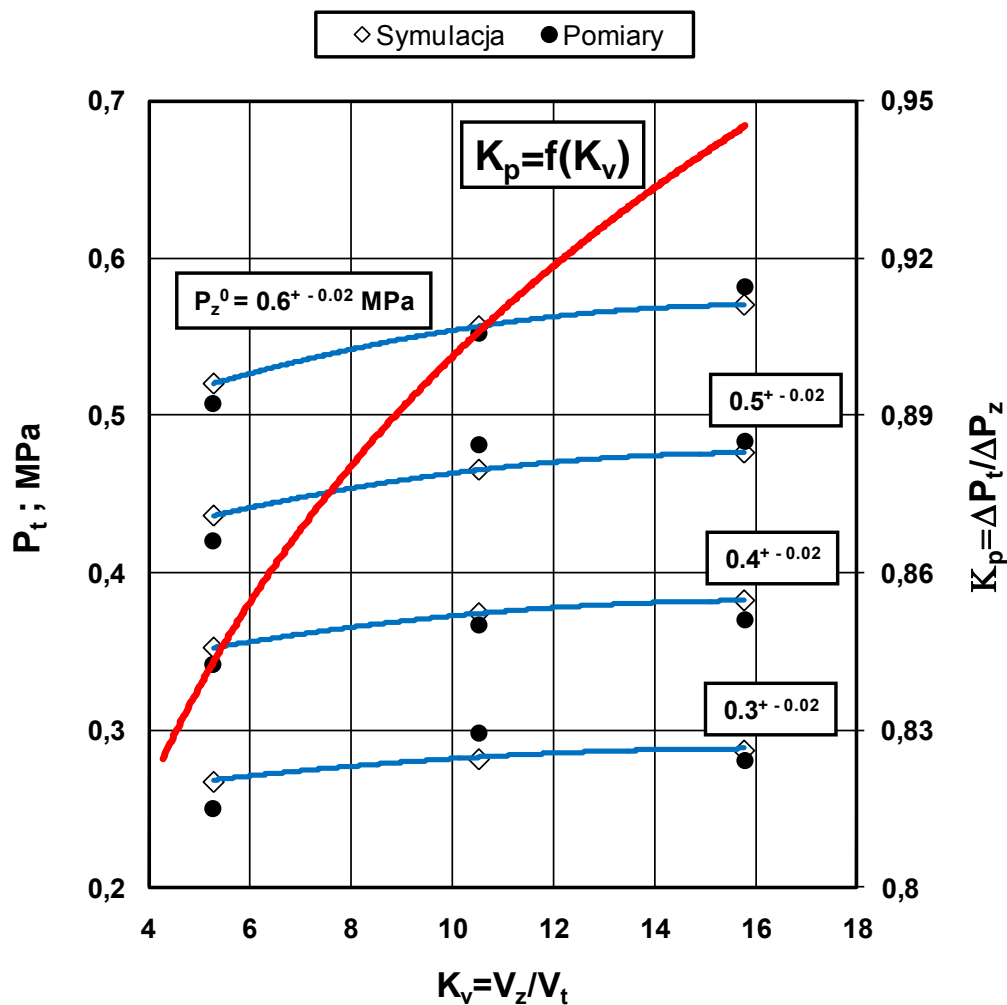


Rys.6. Przykładowe wyniki symulacji I fazy działania maszyny strumieniowej przy zmiennej wartości nadciśnienia początkowego- p_{z0} w zbiorniku wyrównawczym; p_z - nadciśnienie w zbiorniku wyrównawczym, p_t - nadciśnienie w przestrzeni technologicznej

Z kolei dane przedstawione na rysunku 6 pozwalają ocenić wpływ ważnego parametru jakim jest początkowa wartość ciśnienia w zbiorniku wyrównawczym maszyny na przebieg procesu.

Prawidłowy dobór tego parametru ma podstawowe znaczenie dla energochłonności procesu formowania.

Na zbiorczym rysunku 7 w sposób syntetyczny zestawiono wybrane wyniki symulacji i pomiarów- charakteryzujące maksymalne możliwe do osiągnięcia wartości ciśnienia w przestrzeni technologicznej na stanowisku badawczym (przy określonych parametrach wyjściowych). Na podstawie danych z rysunków 5 i 7 widoczne jest że stosowanie zbyt dużego zbiornika wyrównawczego nie ma uzasadnienia technicznego.



Rys.7. Wyniki pomiarów i obliczeń symulacyjnych wartości maksymalnego ciśnienia - P_t ustalającego się w układzie zbiornik wyrównawczy -przestrzeń technologiczna w funkcji stosunku objętości tych przestrzeni V_z / V_t oraz początkowej wartości ciśnienia w głowicy impulsowej- P_z^0 . Zakryte odpowietrzenia w przestrzeni technologicznej ($S_o=0$ %). Linia czerwona stanowi obraz graficzny zależności:

$$K_p = \frac{K_v}{K_v + 1}$$

obejmującej wyniki wszystkich wyników pomiarów i obliczeń P_t .

$K_v = V_z / V_t$ - stosunek objętości odpowiednio: głowicy impulsowej- V_z i przestrzeni technologicznej- V_t ,

$K_p = \Delta P_t / \Delta P_z = (P_t - P_a) / (P_z - P_a)$ - P_z, P_t, P_a - Wartości ciśnienia absolutnego odpowiednio: w głowicy impulsowej (początkowe), przestrzeni technologicznej (końcowe) oraz atmosferyczne.

4. EFEKTY FORMOWANIA

Przeprowadzone pomiary efektów formowania na opisanym wyżej stanowisku potwierdziły podstawowe zalety metody formowania strumieniowego: równomierny rozkład zagęszczenia wzdłuż wysokości formy (po doprasowaniu), wysokie wartości twardości formy otrzymywane na powierzchni podziału już po pierwszym etapie- zagęszczenia strumieniowego, dobre efekty zagęszczenia w trudnych technologicznie rejonach formy. Na rysunku 8 przedstawiono widok jednego z modeli testowych oraz widok wnętrza formy wykonanej metodą strumieniową. Średnia twardość T_A w centralnym obszarze wnętrza osiągała wartość 88 jednostek. Należy podkreślić, że podczas formowania metodami: impulsową czy dynamicznego prasowania (przy dużej dynamice tych procesów) występowały problemy z odpowiednim zagęszczeniem masy w stosunkowo smukłych szczelinach tego modelu.



Rys. 8. Widok modelu elementu zaworu sprężarki i wykonanej metodą strumieniową formy

5. PODSUMOWANIE

We współczesnych strumieniowych maszynach formierskich umożliwiony jest szeroki zakres wyboru parametrów działania. Ze względu na zróżnicowaną dynamikę działania formierek strumieniowych opracowanie modelu ujmującego dokładnie wszystkie zmienne parametry realizowanych procesów jest bardzo trudne. Wykorzystanie modelowania pracy maszyn strumieniowych nawet w oparciu o modele uproszczone oraz wyniki pomiarów dynamicznych ułatwia analizę przebiegu procesu przepływu powietrza oraz ustalenie związków pomiędzy parametrami maszyny a uzyskiwanymi efektami formowania. Zaproponowana metodyka modelowania pracy formierek strumieniowych daje podstawy prawidłowego doboru parametrów maszyny. Może być wykorzystana w procesie projektowania nowych konstrukcji maszyn oraz optymalizacji konstrukcji istniejących. Wyniki modelowania mogą być również wykorzystane w opracowaniu wskaźników energochłonności maszyn strumieniowych.

Literatura

- [1]– Bast J., Muschna M. Mathematische Modellierung der Luftstrompreßverdichtung zur Optimierung der Grünsandformherstellung. Proceedings of the 61st WFO Congress, 1995 Beijing, pp. 24.-29
- [2]– Bast J., Lang L.: Einsatz des Luftstrompressformverfahrens zur Erhöhung der Gussteilqualität. Mat. I Konferencji: Tendencje rozwojowe w mechanizacji procesów odlewniczych. WO AGH, KM-O PAN, STOP oddz./ Kraków; Kraków 24- 25. XI. 1994, s.33- 40
- [3]– Dańko J. Proces wytwarzania rdzeni i form odlewniczych metodą dmuchową. Badania i teoria. Zesz. Nauk. AGH, no. 145, Kraków 1992.
- [4]– Gerc E.W. Dinamika pniewmatischen sistiem maszin. Maszgiz, Moscow 1985.

- [5] – Grolla H.: Ergebnisse und Einsatz des Luftstrom-Pressformverfahrens. Gießerei, 1989, nr 4, s.105 – 109
- [6] – Kikkert L.J., Falier J.: The role of venting in the precompaction of sand by air-flow with the HWS-SEIATSU moulding process. Proceedings of the 58th WFO Congress, 1991 Cracow, Paper No: 37
- [7]– Kollek W., Mikulczyński T., Nowak D., Samsonowicz Z. Simulation research in impulse compacting of moulding sands. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2004, Vol. 4, no. 2, pp. 25-32.
- [8]– Lammel L., Osiadacz A. : Pneumatyczne przetworniki automatyki. WNT, Warszawa 1978
- [9]– Mikulczyński T., Bogdan M., Fita S., Ciskowski S., Dworzak Ł. Wybrane badania symulacyjne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. Odlewnictwo XXI wieku - technologie, maszyny i urządzenia odlewnicze. XI Konferencja Odlewnicza TECHNICAL 2008. Biuletyn konferencyjny. WO AGH, TECHNICAL Nowa Sól, Nowa Sól, 29-31.05.2008, s. 55-60
- [10]– Mikulczyński T. ,Bogdan M., Ciskowski S., Dworzak Ł. Mechanism of impulse compacting of moulding sands. Archives of Foundry Engineering. 2008 vol. 8, spec. iss. 1, s. 211-214
- [11]– Orlov G. M.: Avtomatizacija i mechanizacija processa izgotovljenija litiejnych form. Maszynostrojenije, Moskwa 1988
- [12]– Smyksy K.: Problematyka doboru parametrów impulsowych maszyn formierskich. Przegląd Odlewnictwa, 2001, no.7-8, s. 262–269
- [13]– Smyksy K.: Pomiary impulsowych maszyn formierskich. Prace Naukowe I.T.M. i A. PWr. nr 52, 1993, str. 279- 282.
- [14]– Smyksy K.: Technologiczne aspekty formowania impulsowego. Krzepnięcie Metali i Stopów nr 25, 1995, str.47- 52.
- [15]– Smyksy K.: Some Remarks about Air Flow Processes in Impulse Moulding Machines. Acta Metallurgica Slovaca nr 4, 1998, str. 118-121
- [16]– Smyksy K.: Uwagi o modelowaniu pracy strumieniowych maszyn formierskich. Nowoczesne technologie w odlewnictwie : XXXII konferencja naukowa z okazji Ogólnopolskiego Dnia Odlewnika 2008 : Kraków, 12 grudnia 2008 r. WO AGH, STOP; wyd. nauk. „Akapit”, s. 179-186
- [17]– Stelmach J.: Projektowanie przemysłowych układów automatyki . WNT, Warszawa 1980
- [18]– Wark K.: Thermodynamics. McGraw-Hill, New York, 1983

Opracowano w ramach pracy własnej K. Smyksy: nr 10.10.170.344, 2009r.