



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
im. Stanisława Staszica w Krakowie
WYDZIAŁ ODLEWNICTWA
Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych
Pracownia Mechanizacji, Automatykacji i Projektowania Odlewni



MARCIN ŚLAZYK

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Rozprawa doktorska

Promotor

Prof. zw. dr hab. inż. Roman Wrona

Kraków, 2009

Tą drogą chciałbym złożyć serdeczne podziękowania za pomoc merytoryczną i badawczą w realizacji niniejszej pracy Prof. zw. dr hab. inż. Romanowi Wronie oraz Dr inż. Krzysztofowi Smyksy.

Szczególne podziękowania kieruję również do Pracowników Pracowni za udzieloną pomoc techniczną w budowie stanowiska laboratoryjnego.

Chciałbym również podziękować moim Rodzicom za wsparcie oraz mojej przyszłej żonie, Agnieszce – której pracę dedykuję.

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| WPROWADZENIE | 4 |
| 1. ZAŁOŻENIA PROGRAMOWE..... | 8 |
| 1.1 CEL PRACY | 8 |
| 1.2 TEZA PRACY | 9 |
| 2. PRZEGLĄD WSPÓŁCZESNYCH PNEUMATYCZNYCH METOD STOSOWANYCH W WYKONYWANIU FORM ODLEWNICZYCH..... | 11 |
| 2.1 INFORMACJE OGÓLNE | 11 |
| 2.2 KLASYFIKACJA I PODZIAŁ MASZYN FORMIERSKICH WYKORZYSTUJĄCYCH STRUMIEŃ POWIETRZA W PROCESIE ZAGĘSZCZANIA..... | 12 |
| 2.3 METODY PODCIŚNIENIOWE | 20 |
| 2.4 BADANIA WSTĘPNE PROCESU PODCIŚNIENIOWEGO | 25 |
| 3. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH MODELI OPISUJĄCYCH PROCESY DMUCHOWE | 32 |
| 4. SYNTEZA WŁASNEGO MODELU PRZEPŁYWU STRUMIENIA POWIETRZA W PROCESIE PODCIŚNIENIOWYM..... | 41 |
| 4.1 ZAŁOŻENIA PROCESOWE DO MODELU PRZEPŁYWU | 41 |
| 4.2 MODEL PRZEPŁYWU | 42 |
| 4.3 PORÓWNANIE MODELU WŁASNEGO Z ROZWIĄZANAMI PRAKTYCZNYMI PRODUCENTÓW MASZYN..... | 47 |
| 5. BADANIA SYMULACYJNE I EKSPERYMENTALNE STANOWISKA LABORATORYJNEGO DO FORMOWANIA PODCIŚNIENIOWEGO | 51 |
| 5.1 BADANIA SYMULACYJNE STANOWISKA LABORATORYJNEGO DO FORMOWANIA PODCIŚNIENIOWEGO | 52 |
| 5.2 BADANIA EKSPERYMENTALNE STANOWISKA LABORATORYJNEGO DO FORMOWANIA PODCIŚNIENIOWEGO | 53 |
| 5.3 ANALIZA WYNIKÓW Z BADAŃ NA STANOWISKU LABORATORYJNYM DO FORMOWANIA PODCIŚNIENIOWEGO | 62 |
| 6. METODYKA BADAŃ MODELU FIZYCZNEGO W WARUNKACH LABORATORYJNYCH | 64 |
| 6.1 WPŁYW PODCIŚNIENIA NA EFEKTY ZAGĘSZCZENIA MASY FORMIERSKIEJ..... | 68 |
| 6.2 WPŁYW OBJĘTOŚCI ZBIORNIKA PODCIŚNIENIOWEGO NA EFEKTY ZAGĘSZCZENIA MASY FORMIERSKIEJ | 73 |
| 6.3 WPŁYW OBJĘTOŚCI KOMORY TECHNOLOGICZNEJ I STOPNIA JEJ ZAPEŁNIENIA MASĄ NA EFEKT ZAGĘSZCZENIA | 76 |
| 6.4 WPŁYW WIELKOŚCI I KSZTAŁTU GEOMETRYCZNEGO MODELI NA EFEKTY ZAGĘSZCZENIA I JAKOŚĆ ODWZOROWANIA WNĘKI FORMY | 80 |
| 6.5 WPŁYW WIELKOŚCI ODPOWIETRZEŃ PŁYTY MODELWEJ NA PRZEBIEG PROCESU PODCIŚNIENIOWEGO | 84 |
| WNIOSKI..... | 89 |
| LITERATURA..... | 93 |

Wprowadzenie

Wzrastające wymagania jakościowe, ekonomiczne i środowiskowe w stosunku do technologii wytwarzania, przy coraz większej złożoności konstrukcyjnej odlewów wymuszają konieczność wprowadzania efektywnych, bardziej dokładnych i jednocześnie mniej pracochłonnych metod wytwarzania form odlewniczych. W procesie odlewniczym zjawiska zachodzące w masach formierskich podczas wykonywania form są w centrum uwagi ośrodków naukowych i przede wszystkim producentów maszyn i urządzeń. Warunki wykonywania form powinny być podbudowane dogłębną znajomością procesu zagęszczania masy, zmian własności technologicznych masy, zdolności do odtwarzania kształtu modelu i wykorzystania energii zagęszczania. Spowoduje to, że proces formowania będzie procesem ekonomicznie korzystnym, a w rezultacie dający formy o wysokiej jakości.

Z dotychczas przeprowadzonych badań własnych oraz z danych literaturowych można stwierdzić, że zagęszczanie metodą podciśnieniową realizowane etapowo stwarza pewne możliwości spełnienia stawianych wymogów. Etapowość oznacza, że proces wykonywania form składa się z dwóch okresów; transportu masy do przestrzeni formy czemu towarzyszy wstępne zagęszczenie masy oraz dogęszczenie (okres drugi) metoda doprasowania. Aktualnie stosowane metody w rozwiązaniach technicznych uwzględniają transport masy do przestrzeni technologicznej formy. W tych przypadkach korzyścią jest wykorzystanie energii strumienia wielofazowego. Cechą wielofazowości strumienia jest jego struktura składająca się z powietrza jako nośnika oraz masy formierskiej.

Wstępne zagęszczanie jest efektem działania gradientu ciśnienia wpływającego na równomierne rozłożenie warstw masy. W konsekwencji powoduje to, że rozkład wstępnego zagęszczenia w rejonach krytycznych na powierzchni modelu oraz pomiędzy modelem, a ściankami skrzynki jest równomierny bez względu na stopień rozwinięcia powierzchni ścian modelu. Równomierne zagęszczenie to bardzo ważny wymóg technologiczny. Nierównomierne rozłożenie masy w początkowym okresie może być przyczyną wad powierzchniowych bez względu na końcowe dogęszczenie

masy. Przy odpowiednim podciśnieniu i odpowiedniej ilości masy stosownie do objętości formy, zagęszczanie z reguły przebiega w trakcie jednego cyklu i równocześnie w całej objętości formy. Oznacza to, że w zagęszczeniu biorą udział wszystkie warstwy masy rozłożone na wysokości modelu – skrzynki. W trakcie procesu następuje wzajemne oddziaływanie poszczególnych warstw zorientowane zgodnie z kierunkiem działania gradientu ciśnienia. W wyniku takiego ruchu masy największe zagęszczenie wykazują warstwy przy płycie modelowej. Niezależnie od ruchu masy w całej objętości skrzynki występuje hamowanie przemieszczania się warstw masy w wyniku oporu na powierzchni płyty modelowej. W związku z tym wzrastają dodatkowo naprężenia w dolnych warstwach co wpływa korzystnie na rozkład gęstości masy w dolnej i środkowej części formy.

Pomimo, że proces podciśnieniowy jest stosowany w niektórych rozwiązaniach maszyn (w wariacie z transportem maszyn) to nadal występuje brak pełnych rozwiązań, które jednoznacznie identyfikowałyby możliwości tej technologii. W dalszym ciągu w tym zakresie odczuwa się potrzebę stworzenia zasad działania tej metody w nawiązaniu do zróżnicowanego asortymentu odlewów, a następnie możliwości mechanizacji w zakresie budowy zintegrowanych automatów formierskich.

Przedsiębiorstwa z branży odlewniczej i maszynowej skupiają się głównie na rozwoju technicznym, natomiast w nieznacznym stopniu zwracają uwagę na to, jak duże znaczenie mają zjawiska występujące w objętości masy podczas zagęszczania. Często stosują metodę prób i błędów, która w obecnej sytuacji rynkowej nie ma uzasadnienia ekonomicznego. Perspektywicznie zainteresowanie producentów maszyn z pewnością wzrośnie, gdy powstanie naukowa teoria tego procesu mająca przełożenie na pragmatykę w budowie maszyn formierskich.

Wyniki badań zaplanowane w niniejszej pracy będą miały duże znaczenie naukowe, gdyż wykorzystanie modelu teoretycznego do opisu zjawisk zachodzących podczas przepływu powietrza w instalacji podciśnieniowej, wniesie dodatkowy wkład do dorobku nauk odlewniczych. Z drugiej strony opracowanie konstrukcji zespołów tworzących zintegrowany system formowania wniesie nowoczesny wkład

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

do praktyki stosowania technologii i produkcji zmechanizowanych układów wykonywania form.

W dostępnej literaturze zostały bardzo dobrze opracowane metody wykorzystujące nadciśnienie powietrza, zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym. Są to metody strumieniowe i impulsowe. Istnieje szereg rozwiązań praktycznych wykorzystujących wymieniowe metody formowania w odlewniach na całym świecie. Jednak wśród dostępnych informacji jak również wśród publikacji, trudno znaleźć jakiegokolwiek dane o metodzie podciśnieniowej, pomimo że jest ona stosowana w wielu maszynach. Sugeruje to brak dostatecznego opracowania tej metody pod względem naukowym, umożliwiającego jej wykorzystanie w praktyce.

W technologii wykonywania form zalewanych na wilgotno, stosowanej w automatycznych liniach odlewniczych zastosowanie obniżonego ciśnienia w przestrzeni technologicznej umożliwia uzyskanie zadowalającego zagęszczenia wstępnego, a przez to poprawę efektów zagęszczania ostatecznego przez prasowanie. Proces podciśnieniowy stosowany jest z dużym powodzeniem w automatach do formowania bezskrzynkowego i skrzynkowego. Zarówno przy formowaniu skrzynkowym jak i bezskrzynkowym proces podciśnieniowy realizuje pewną odmianę procesu dmuchowego. Ze względu na stosunkowo niskie wartości gradientu ciśnienia na warstwach masy w metodzie tej nie uzyskuje się wysokich efektów zagęszczania wstępnego, można jednak uzyskać wyraźną poprawę zagęszczenia w trudnych technologicznie rejonach formy (w stosunku do samego prasowania). Technologia ta z powodzeniem jest, a perspektywicznie będzie rozwijana w metodach formowania skrzynkowego i bezskrzynkowego.

Stworzenie podstaw teoretycznych procesu jak również zweryfikowanie jego praktycznymi badaniami jest konieczne, co w przyszłości uzupełni istniejącą lukę w opracowaniach naukowych. Ujęcie teoretyczne badanego zjawiska umożliwi optymalizację procesu formowania podciśnieniowego oraz ułatwi prawidłowy dobór parametrów instalacji podciśnieniowej. Instalacja podciśnieniowa będzie konkretnym efektem do wspomaganie metod formowania. W konsekwencji wyniki badań i ujęcie ich w postaci założeń projektowych przyczyni się do doskonalenia konstrukcji

maszyn formierskich z przeznaczeniem do wykonywania form do odlewów o znacznie szerszym asortymencie niż to ma miejsce obecnie.

Rozprawa doktorska została zrealizowana w ramach projektu promotorskiego nr: N507 164 32/0837 finansowanego ze środków na naukę w latach 2007-2008 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

1. Założenia programowe

1.1 Cel pracy

Celem pracy jest stworzenie i opracowanie podstaw teoretycznych procesu formowania podciśnieniowego w zakresie przepływu powietrza w instalacji podciśnieniowej. Proces formowania podciśnieniowego jest z dużym powodzeniem stosowany w nowoczesnych odlewniczych maszynach formierskich. Pomimo to, brak jest dokładnie sprecyzowanych podstaw teoretycznych tego procesu, szczególnie w zakresie teorii przepływu w instalacji pomiędzy źródłem a komorą technologiczną.

Mając to na uwadze za cel niniejszej pracy przyjęto: **opracowanie modelu procesu przepływu powietrza w maszynach podciśnieniowych umożliwiającego ocenę działania instalacji podciśnieniowej, opracowanie metodyki badania zjawisk zachodzących podczas zagęszczania masy formierskiej w komorze technologicznej, ocenę wpływu podstawowych parametrów na efekty zagęszczania podciśnieniowego.**

Realizacja celu nastąpi poprzez stworzenie modelu procesu i wykonanie instalacji w systemie zagęszczania podciśnieniowego. Proces zagęszczania w formie oraz dynamika przepływu w instalacji jest podstawą do symulacji komputerowej ułatwiającej analizę i syntezę zależności kinematyczno-dynamicznych.

Wyniki symulacji a także przyjęte kryteria oceny posłużą do określenia relacji pomiędzy modelem teoretycznym i modelem rzeczywistym. Jako model rzeczywisty przyjęto stanowisko badawcze w wykonaniu laboratoryjnym.

1.2 Teza pracy

Proces formowania podciśnieniowego jako proces dynamiczny jest charakteryzowany parametrami, które odzwierciedlają zjawiska lub fazy zachodzące podczas całego cyklu. Jest to uwarunkowane przepływem strumienia gazowego (powietrza) przez ośrodek porowaty (masę formierską) oraz elementami konstrukcyjnymi tworzącymi instalację podciśnieniową. Do instalacji zalicza się: zbiornik podciśnieniowy, przewody łączące zbiornik z maszyną formierską, zawory elektromagnetyczne umożliwiające szybkie rozpoczęcie przepływu powietrza oraz stanowisko formowania podciśnieniowego o wysokim stopniu szczelności układu. Integralną częścią stanowiska jest komora technologiczna (imitująca skrzynkę formierską), w której podstawę stanowi płyta modelowa z otworami odpowietrzającymi. Część pomiarową instalacji podciśnieniowej stanowią przetworniki podciśnienia rejestrujące przepływ powietrza w poszczególnych elementach instalacji.

Podstawą do scharakteryzowania procesu zagęszczania – formalnego ujęcia, jest proces przepływu powietrza, który decyduje o efektach procesu formowania podciśnieniowego. Czynnikiem powodującym przepływ o odpowiedniej dynamice jest gradient ciśnienia, uzależniony od różnicy ciśnień występujących nad i pod warstwą masy. W związku z tym teza pracy została sformułowana w następującym brzmieniu:

„Dynamika zmian ciśnienia jest podstawowym czynnikiem decydującym o przebiegu i efektach procesu zagęszczania podciśnieniowego. Wpływ ten jest szczególnie istotny w zakresie niskich wartości ciśnienia, w przestrzeniach formy z modelami o rozbudowanej płaszczyźnie ścian, charakteryzujących się dużą smukłością szczelin. Modelowanie procesu przepływu powietrza w przestrzeniach maszyny podciśnieniowej umożliwia optymalny dobór parametrów instalacji podciśnieniowej.”

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Proces udowodnienia tezy jest możliwy poprzez weryfikację założeń i modelu teoretycznego na modelach rzeczywistych. Procedura udowodnienia tezy będzie przebiegała według następujących etapów:

- opracowanie modelu procesu przepływu powietrza
- opracowanie i adaptacja metod symulacji komputerowej do analitycznego zweryfikowania modelu
- projekt i wykonanie stanowiska badawczego, na którym zostanie przeprowadzona seria badań doświadczalnych
- weryfikacja modelu teoretycznego na podstawie wyników badań doświadczalnych
- przeprowadzenie badań procesu zagęszczania podciśnieniowego wraz z analizą i oceną efektów formownia

2. Przegląd współczesnych pneumatycznych metod stosowanych w wykonywaniu form odlewniczych

2.1 Informacje ogólne

Analiza dostępnych publikacji na temat zmechanizacji procesu formowania, wyraźnie wskazuje na znaczny postęp w tej dziedzinie. Dotyczy to dynamicznego rozwoju konstrukcji maszyn, zwiększenia ich wydajności i niezawodności oraz postępu w zakresie automatyzacji i sterowania.

Poza wymienionymi efektami w rozwoju istotne jest wprowadzenie do praktyki odlewniczej formierek pracujących według nowych sposobów zagęszczania. Jak dotychczas w obszarze nowości i zainteresowania konstruktorów pozostają głównie metody zagęszczania dynamicznego: strumieniowego, impulsowego i podciśnieniowego. Wiodące firmy produkujące maszyny odlewnicze mają w swoim asortymencie formierki wykorzystujące wymienione powyżej metody. Są to między innymi HWS (proces strumieniowy), DISA, Technical (proces impulsowy) [27]. Metodę podciśnieniową stosowaną początkowo w formowaniu bezskrzynekowym wprowadzono również do formowania skrzynekowego - maszyny serii VACUPRESS niemieckiej firmy Künkel – Wagner. Formierki wykorzystujące tą metodę posiada również w swoich automatach formierskich firma DISA.

W praktyce dominuje zagęszczenie dwustopniowe: wstępne – proces dmuchowy lub podciśnieniowy, końcowe – prasowanie.

Dwuetapowość procesu polega na tym, że w pierwszym etapie następuje dozowanie i wstępne zagęszczenie masy formierskiej. Dzieje się to pod wpływem gradientu ciśnienia występującego w warstwach masy formierskiej. Drugi etap, uznawany za zasadniczy, jest realizowany poprzez naciski wywierane na warstwę masy. Proces doprasowania może być realizowany poprzez głowicę wielotłokową, płaską płytę lub głowicę przeponową. Efektem tego etapu jest ostateczne zagęszczenie masy formierskiej do wymaganego stopnia jej wytrzymałości.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Klasyfikując procesy wytwarzania form odlewniczych wykorzystujące metody pneumatyczne, wyróżnia się dwa główne warianty:

- ✓ formowanie z wykorzystaniem nadciśnienia powietrza; są to metody strumieniowe i impulsowe,
- ✓ formowanie wykorzystujące obniżone ciśnienie powietrza nazywane formowaniem podciśnieniowym.

W rozwiązaniach konstrukcyjnych obydwu metod istnieje dodatkowy podział ze względu na sposób wprowadzania masy do skrzynki formierskiej i zagęszczania, który rozróżnia:

- ✓ wprowadzenie masy z jednoczesnym jej wstępnym zagęszczeniem w formie i doprasowaniem,
- ✓ wprowadzenie masy bez wstępnego zagęszczania.

2.2 Klasyfikacja i podział maszyn formierskich wykorzystujących strumień powietrza w procesie zagęszczania.

Metoda wykorzystująca sprężone ciśnienie została wprowadzona na początku minionego wieku przez firmę Demmler z USA i udoskonalona po II wojnie światowej. Przedmiotem udoskonalenia było skonstruowanie strzelarki do wykonywania rdzeni [6,17]. Kolejnym etapem rozwoju było zastosowanie w 1979 m.in. przez firmę Künkel - Wagner metody z zastosowaniem podciśnienia.

Ogólnie ujmując, czynnikiem zagęszczającym jest sprężone powietrze, które przekazuje energię cząstkom zagęszczanej masy. W tradycyjnych maszynach dmuchowych cząstki masy są przenoszone z okresowo napełnianego zbiornika tzw. komory nabojeowej do przestrzeni technologicznej poprzez otwory dmuchowe. W zależności od dynamiki narastania ciśnienia oraz gęstości strumienia piaskowo-powietrznego rozróżnia się metodę nadmuchiwania i strzelania. W przypadku

zagęszczania impulsem fali ciśnieniowej, przemieszczanie masy odbywa się jedynie w skrzynce formierskiej, pod naciskiem sprężonego powietrza.

Parametrem, który pozwala w istotny sposób rozróżnić proces nadmuchiwania od wstrzeliwania jest wartość współczynnika koncentracji (objętościowej lub ciężarowej):

$$\mu = \frac{G_m}{G_p} \text{ lub } \mu_v = \frac{V_m}{V_p} \quad (1)$$

Gdzie: G_m i G_p oraz V_m i V_p to odpowiednio ciężar lub objętość masy formierskiej i powietrza przenoszącego masę [1,6,17].

Ogólnie maszyny wykorzystujące w procesie zagęszczania strumień powietrza można podzielić, w zależności od sposobu wymuszenia przepływu powietrza na:

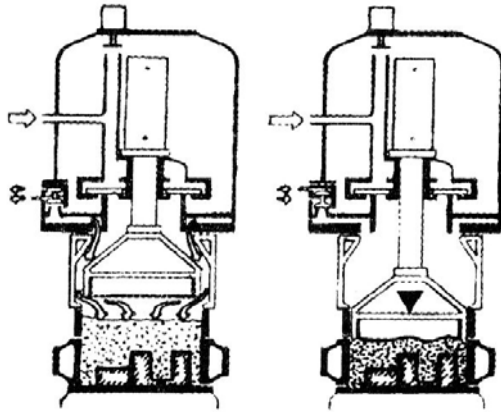
- nadciśnieniowe
- podciśnieniowe

Natomiast pod względem dozowania masy do przestrzeni technologicznej oraz moment czasowy oddziaływania strumienia powietrza na masę rozróżnia się:

- transport masy do przestrzeni technologicznej w strumieniu powietrza (metody dmuchowe- nadciśnieniowe i podciśnieniowe)
- dozowanie grawitacyjne z następnym zagęszczaniem strumieniowym (metody nadciśnieniowe- Seiatsu, impulsowe i podciśnieniowe)

W literaturze można znaleźć szereg różnorodnych rozwiązań maszyn impulsowych [2,3,11,14,25,30]. Zalicza się do nich między innymi nadstawki, perforowane płyty umieszczone pomiędzy głowicą impulsową, a powierzchnią swobodną masy formierskiej. Przykładowe rozwiązanie podano na rysunku 1.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



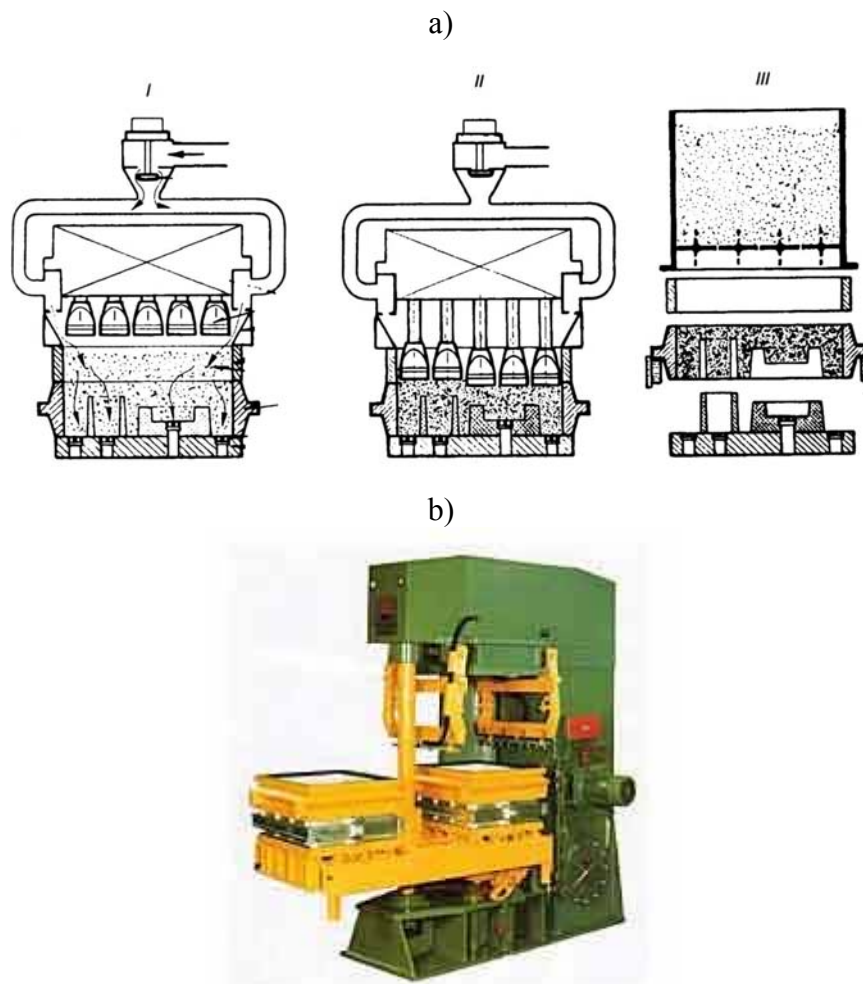
Rys. 1. Głowica Turbo -Impuls firmy +GF+ [27]



Rys. 2. Formierka impulsowa FT firmy Technical [27]

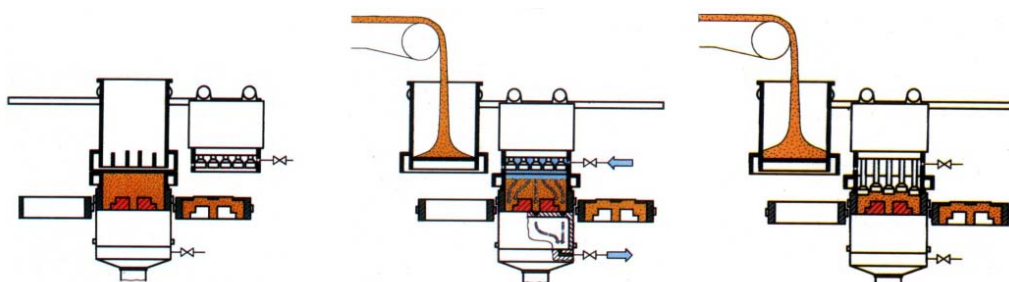
Wyrazem najnowszych tendencji w zakresie formowania impulsowego jest rozwiązanie Impact Multi System firmy Georg Fischer - rysunek 1. Dwa zawory impulsowe o zróżnicowanej powierzchni i dynamice działania umożliwiają kształtowanie przebiegu sprężonego ciśnienia powietrza nad powierzchnią masy. Sposób zmiany ciśnienia, a zwłaszcza zróżnicowanie mocy impulsu w poszczególnych fazach procesu stwarza lepsze warunki zagęszczenia w krytycznych rejonach formy. Uzupełnieniem zagęszczania jest doprasowanie masy, poprawiające zagęszczenie w górnych rejonach formy [39]. Kolejną firmą, która z powodzeniem stosuje impulsowe zagęszczenie jest Technical Nowa Sól. Oferuje ona formierki impulsowo-pracujące typu FT (rys. 2)

Następnym przykładem zastosowania sprężonego powietrza jest formierka kombinowana, której rozwiązanie bazuje na procesie Seiatsu. We wstępnej operacji zachodzi zagęszczanie formy strumieniem sprężonego powietrza, o znacznie mniejszej szybkości narastania ciśnienia nad masą formierską niż w przypadku metody impulsowej, po czym następuje prasowanie [3,7,8,17].



Rys. 3. Kombinowana metoda formowania Seitsu (Heinrich Wagner - Sinto)
a – zasada działania, b - widok.[3,17,27]

Bazując na tym rozwiązaniu, Künkel – Wagner oferuje automaty formierskie serii Airpress (rys. 4).

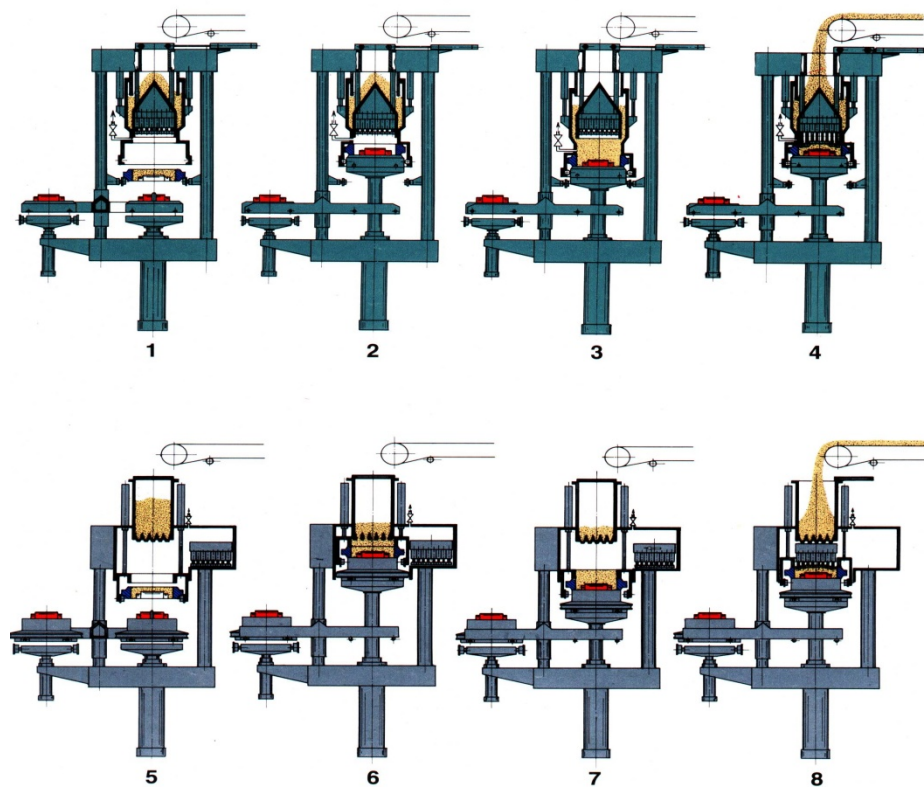


Rys. 4. Maszyny firmy Künkel –Wagner, seria Airpress [27].

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Formowanie podciśnieniowe polega na zasysaniu masy formierskiej z zasobnika do przestrzeni technologicznej w której obniżono ciśnienie, co powoduje wstępne jej zagęszczenie [48]. Końcowe zagęszczenie masy formierskiej odbywa się na stanowisku prasowania [62].

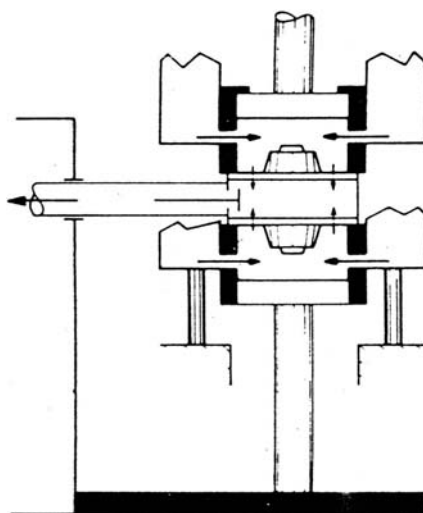
Przykładem jest maszyna formierska firmy Künkel – Wagner VACUPRESS (rys. 5).



Rys. 5. Maszyna formierska VACUPRESS firmy Künkel - Wagner.[27]

W ofercie są dwa typy takich maszyn: 1 – z czterostronnym napełnianiem formy i zespołem zamiany płyt modelowych, ze stacjonarną głowicą prasującą, wewnątrz zasobnika masy (1 – 4), 2 – z przejezdną głowicą prasującą, z ułatwioną ewakuacją masy z zasobnika (5 – 8). W obydwu przypadkach doprasowanie odbywa się za pomocą głowicy wielotłokowej- rysunek 5 [11,17].

Kolejną firmą wykorzystującą w swych maszynach podciśnienie jest firma Karl Heinz Sailer. Zastosowano tu metodę Haflingera [27] z bocznym odprowadzeniem powietrza (rys. 6).



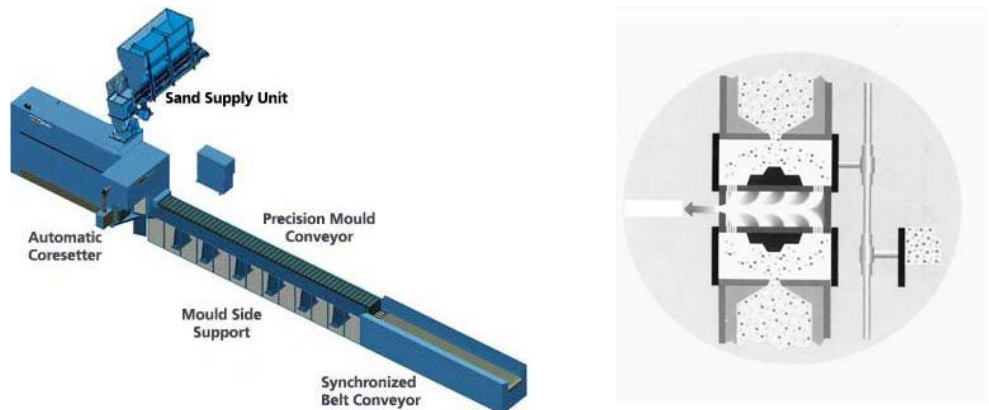
Rys. 6. Stanowisko formowania podciśnieniowego z doprasowaniem firmy Haflinger [27]

Firma Haflinger stosuje w pierwszym etapie wprowadzenie masy do skrzynki formiarskiej za pomocą podciśnienia i jej wstępne zagęszczenie. Powietrze przepływa przez szczeliny w płycie modelowej do przewodu rurowego z zaworem. W drugim etapie dwie płyty prasujące o regulowanej sile prasowania, poruszają się równocześnie w kierunku formy i doprasowują masę formiarską. Kolejnym etapem jest oddzielenie modelu od formy.

Niemiecka firma Künkel – Wagner ma w swojej ofercie automat wykorzystujący zarówno sprężone powietrze jak i podciśnienie. Maszyny te pochodzą z serii Airpress i Vacupress. Pierwszym etapem jest zagęszczanie sprężonym powietrzem lub podciśnieniem, a następnie doprasowanie głowicą wielotłokową. Künkel – Wagner produkuje też maszyny będące kombinacją dwóch powyższych serii - Variopress.

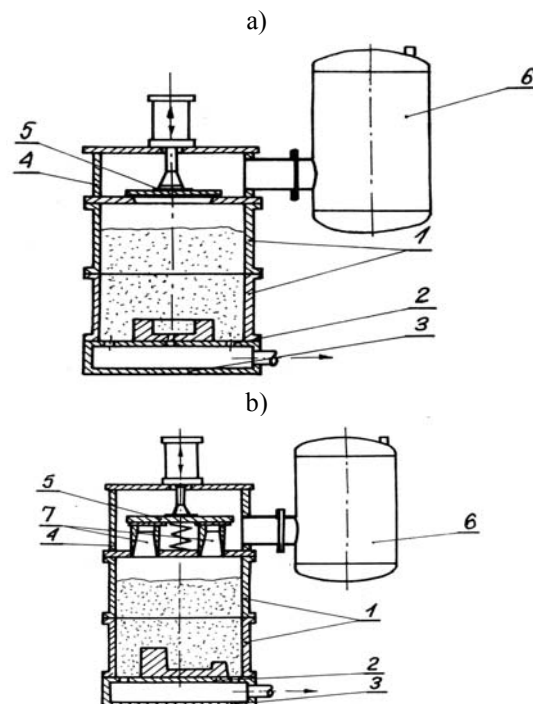
Firma Disa Forma proponuje linię formiarską, w której również zastosowano metodę formowania podciśnieniowego z doprasowaniem. Linia ta charakteryzuje się poziomym podziałem formy, jest to automat bezskrzynkowy z wysokimi naciskami prasowania (rys. 7).

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 7. Automat formierski Disa Forma.[27]

Firma BMD zaproponowała kilka wariantów formierek podciśnieniowo – impulsowych. Istotną cechą jest to, że podciśnienie w przestrzeni technologicznej wytwarza się po napełnieniu skrzynki masą formierską. Po napełnieniu skrzynki masą, następuje opróżnienie przestrzeni technologicznej, po czym oddziaływanie się na masę strumieniem sprężonego powietrza. Automaty tego typu mogą wykonywać jedną jak również dwie półformy jednocześnie (rys. 8).



Rys. 8. Schemat maszyn formierskich wg patentów firmy BMD [27] .
1 –skrzynki formierskie, 2- odpowietrzenia, 3- komora próżniowa, 4 –komora wstępna, 5 – zawór, 6 – zbiornik ciśnieniowy, 7- dysze Lavel'a

W maszynach impulsowych wykorzystuje się ideę zagęszczania masy formierskiej falą sprężonego powietrza o wartości ciśnienia pomiędzy 0,4 do 0,6 MPa wywołaną poprzez nagłe otwarcie zaworu o dużym przekroju [12,15,28,29,44]. Zawór impulsowy łączy dwie przestrzenie; głowicę impulsową o wyższym ciśnieniu i skrzynkę z nadstawką o niższym ciśnieniu. Po otwarciu zaworu impulsowego (który zapewnia nagły – liczony w milisekundach – wzrost ciśnienia nad powierzchnią masy, wzrost ten sięga powyżej 10 MPa/s) następuje zagęszczenie masy formierskiej w skrzynce formierskiej. Bardzo ważną rolę w tym sposobie formowania odgrywają otwory odpowietrzające, odprowadzające sprężone powietrze z komory technologicznej, a dokładnie z przestrzeni międzyziarnowych osnowy masy formierskiej. Odpowiednie rozmieszczenie tych otworów jest warunkiem dostatecznego zagęszczenia masy formierskiej, szczególnie w rejonach krytycznych formy odlewniczej.

Zagęszczenie w tym etapie definiowane jest jako wstępne. W drugim etapie następuje doprasowanie płaską płytą ewentualnie głowicą wielotłokową.

Strumieniowe maszyny formierskie również wykorzystują sprężone powietrze w procesie zagęszczania masy, jednak prędkość narastania ciśnienia jest dużo mniejsza niż w przypadku formierek impulsowych i wynosi około 1 MPa/s. Przykładem są formierki strumieniowe firmy HWS wykorzystujące proces Seiatsu – proces cichego formowania. Również w tym przypadku konieczne jest doprasowanie formy w drugim etapie formowania.

Procesy formowania wykorzystujące sprężone powietrze są powszechnie stosowane w maszynach odlewniczych. Wszyscy producenci mają w swojej ofercie maszyny wykorzystujące wyżej omawiane odmiany tego procesu. W dostępnej literaturze można znaleźć szczegółowe dane omawiające te procesy zarówno pod względem teoretycznym – został opracowany model matematyczny procesów zachodzących podczas formowania impulsowego, strumieniowego i dmuchowego, jak i pod względem praktycznym. Istnieje szereg opracowań – artykułów oraz publikacji - które wyjaśniają szczegóły tych procesów [3,6,11,14,15,28,31,32,37].

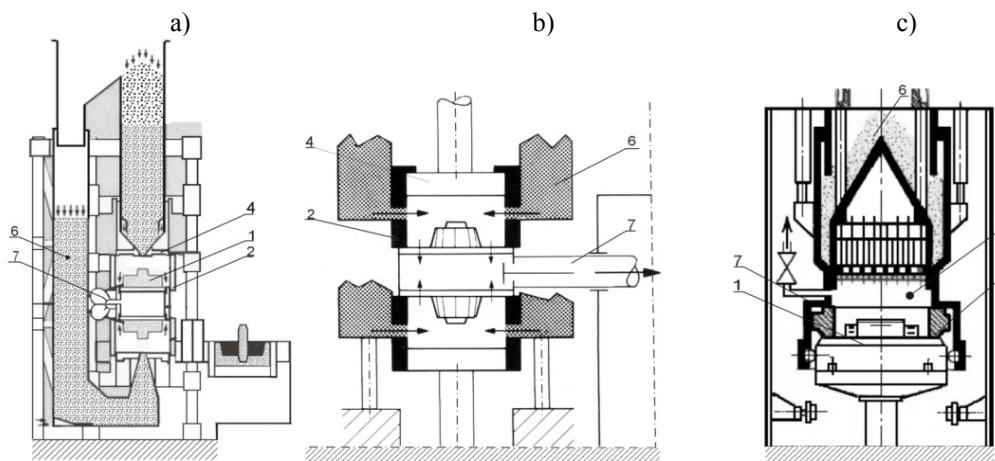
2.3 Metody podciśnieniowe

Dostępne dane literaturowe, wliczając w to prospekty reklamowe producentów oraz informacje w Internecie dotyczące metod bazujących na formowaniu podciśnieniowym, mają raczej charakter techniczny, a nawet informacyjny. Brak jest podstaw naukowych omawianego procesu. Dane te z reguły są publikowane przez producentów maszyn, w których wykorzystano metodę formowania podciśnieniowego.

W przeciwieństwie do metod formowania, w których używane jest sprężone powietrze, metoda zagęszczenia podciśnieniowego jest głównie stosowana we wstępnym zagęszczeniu masy formierskiej. Odmiany tej metody są dwoma wariantami różniącymi się w trybie, w którym próżnia działa na masę. Pierwszy wariant to proces z transportem masy do wnęki formy, a drugi gdy masa formierska znajduje się już w przestrzeni technologicznej formy odlewniczej i zostaje wstępnie zagęszczona podciśnieniem powietrza.

Przy zagęszczaniu na stanowisku formowania podciśnieniowego proces zagęszczania zachodzi pod wpływem oddziaływania gradientu ciśnienia wywołanego otwarciem zaworu pomiędzy zbiornikiem podciśnieniowym, a przestrzenią technologiczną. Powietrze przepływając napotyka na opór masy, powodując jej zagęszczenie. Przy odpowiednim podciśnieniu i ilości masy, forma wykonywana jest w trakcie jednego cyklu. Przebieg procesu rozpoczyna się równocześnie na wysokości całej formy. Podczas ruchu masy na dolne warstwy oddziałują warstwy górne i w końcowej fazie to one mają największy stopień zęszczenia. Na górne warstwy działa ciśnienie atmosferyczne dociskając je do dolnych warstw. Przemieszczające się warstwy masy są wyhamowywane przez płytę modelową, co prowadzi do wystąpienia sił inercji skierowanych w dół. W związku z tym dodatkowo wzrastają naprężenia występujące w dolnych warstwach. Wynikiem opisanego przebiegu procesu jest korzystny rozkład gęstości masy w dolnej i środkowej części formy odlewniczej [52,54,55],

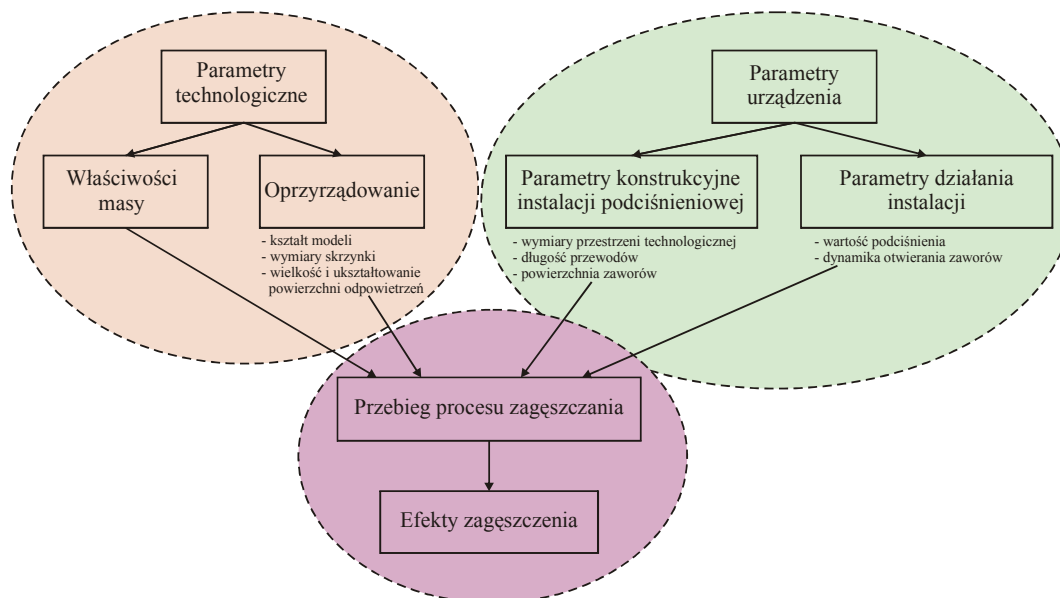
Metoda podciśnieniowa z powodzeniem jest stosowana w technologii formowania bezskrzynkowego jak i skrzynkowego. Na rysunku 8 przedstawiono wybrane rozwiązania maszyn w których realizowany jest omawiany proces jako wstępny etap zagęszczania. Można stwierdzić, że w prezentowanych przykładach proces podciśnieniowy występuje jako swoista odmiana procesu dmuchowego-wywołany połączeniem przestrzeni technologicznej z instalacją próżniową. Gradient ciśnienia i związany z nim przepływ powietrza powoduje transport masy formierskiej z zasobnika do komory formowania. Wartość ciśnienia absolutnego w przestrzeni technologicznej wynosi średnio 20 kPa [10]. Według innych źródeł: 40 do 60 kPa [18]. Z technicznego punktu widzenia są to wartości stosunkowo łatwe do osiągnięcia [53, 56]. Ze względu na stosunkowo niskie wartości gradientu ciśnienia na warstwach masy (efektywny gradient jest niższy od 100 kPa) w metodzie tej nie można oczekiwać wysokich efektów zagęszczania wstępnego. Ostateczne zagęszczenie realizowane jest przez prasowanie w różnych wariantach; głowica wielotłokowa, przepona z wypełnieniem (rys 9).



Rys. 9 . Schematy maszyn formierskich, w których zastosowano formowanie podciśnieniowe z doprasowaniem[27]: a) Disa Forma (formowanie bezskrzynkowe), b)Haflinger; (formowanie bezskrzynkowe), c)Vacupress - Künkel-Wagner (formowanie skrzynkowe); 1- płyta modelowa, 2-przestrzeń technologiczna, 3-skrzynia formierska, 4-płyta prasująca, 5-głowica wielotłokowa, 6-zasobnik masy formierskiej

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

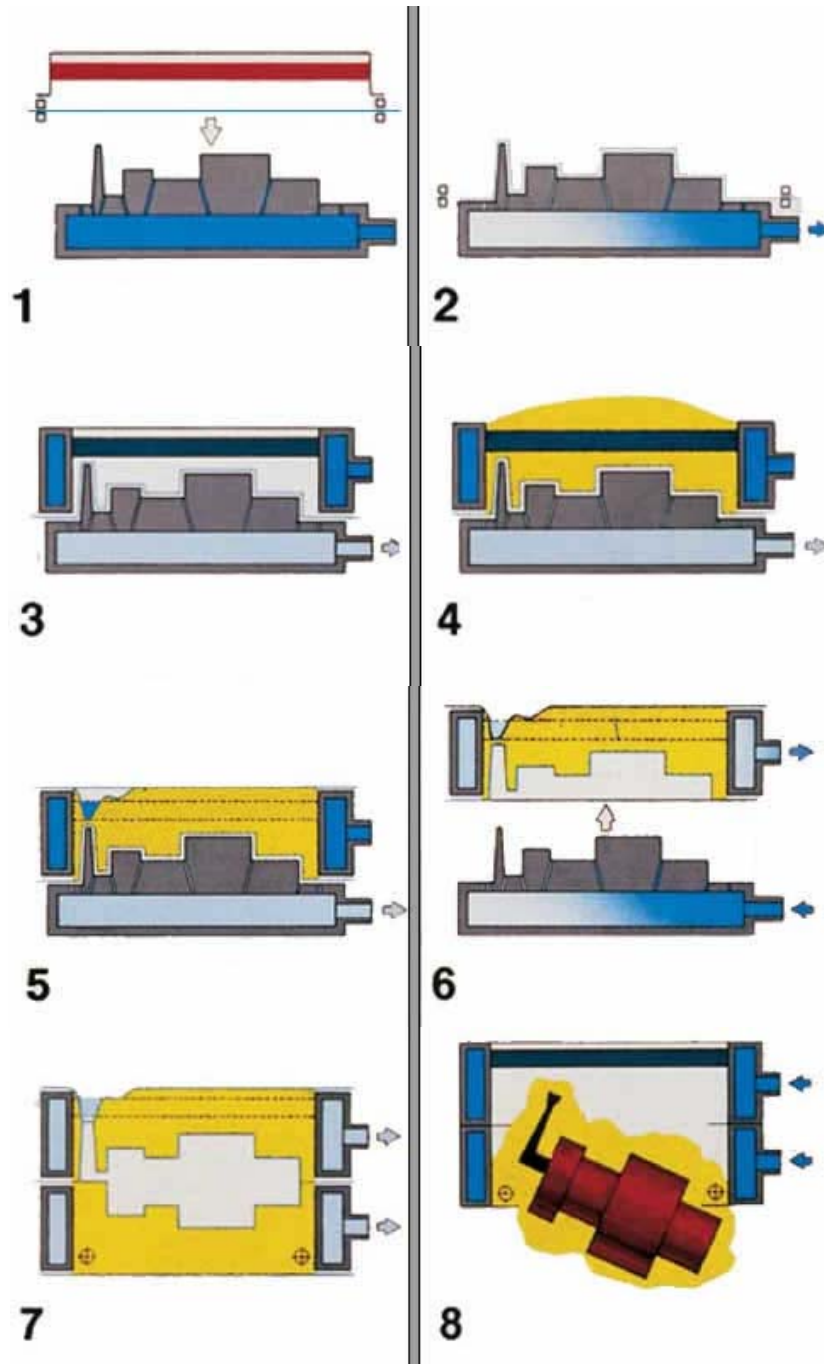
W literaturze często podkreśla się możliwość otrzymywania równomiernego i wysokiego zagęszczenia, także w przypadku trudnych technologicznie modeli, dobre odwzorowanie ich konturów, małe zużycie modeli oraz ergonomiczne zalety tej metody formowania: niski poziom emisji hałasu – poniżej 85 dB (A), małe zapylenie. Przedstawione w publikacji [53] rezultaty formowania tą metodą obejmują zakres twardości od 55 do nawet 99 jednostek na ściankach pionowych formy oraz od 70 do 95 jednostek na ściankach poziomych – zależnie od miejsca dokonywania pomiaru (stosowano płytę z modelami, o zróżnicowanym stopniu trudności ze względu na formowanie). Biorąc pod uwagę nakłady energetyczne związane z pracą instalacji podciśnieniowej oraz stosunkowo duże objętości opróżnianych z powietrza przestrzeni można spodziewać się w powyższych układach znaczących nakładów energetycznych (w stosunku do osiągniętych efektów zagęszczania wstępnego). Podobnie jak w innych metodach formowania strumieniowego wymagana jest szczelność przestrzeni technologicznej. Efekty formowania tą metodą są uzależnione od wielkości uzyskiwanego podciśnienia, parametrów instalacji podciśnieniowej takich jak wielkość zbiornika podciśnieniowego, średnica przewodów łączących zbiornik z komorą pod płytą modelową, wielkością skrzyni formierskiej. Należy również zwrócić szczególną uwagę na parametry masy formierskiej, gdyż proces jest bardzo wrażliwy na stopień jej spulchnienia. Wymienione parametry oraz powiązania pomiędzy nimi ujmuje diagram pokazany na rysunku 10.



Rys. 10. Parametry systemu formowania podciśnieniowego

Kolejnym przykładem zastosowania podciśnienia w maszynach formierskich jest proces formowania podciśnieniowego znany jako „V-proces” [7,17,27]. Proces ten polega na wykorzystaniu suchego piasku, zamiast masy formierskiej. Eliminuje to konieczność używania maszyn związanych z formowaniem przy użyciu klasycznej masy formierskiej. Formowanie tego typu wymaga stosowania specjalne płyt modelowych wraz ze skrzynkami formierskimi (konieczność odessania powietrza), system transportu i chłodzenia suchego piasku (po wybiciu formy) oraz system odpylania. Zasada działania procesu została pokazana na rysunku 11. Omawiany proces z powodzeniem stosuje w swoich maszynach niemiecka firma Henrich Wagner Sinto.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

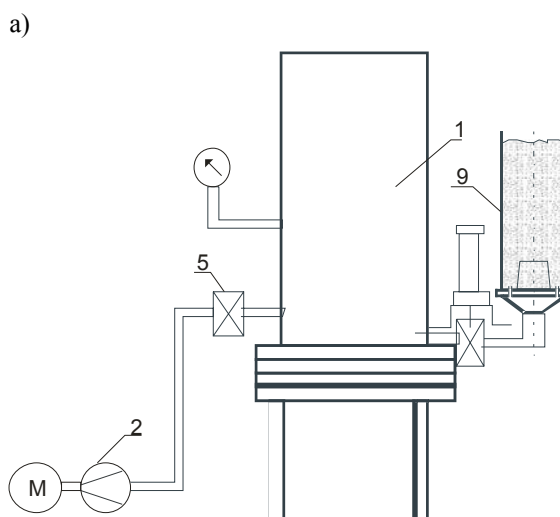


Rys. 11. Etapy formowania „V-process”; 1- nałożenie termokurczliwej folii na płytę modelową wyposażoną w systemem odciągania powietrza, 2- odessanie powietrza, 3- nałożenie skrzyni formierskiej na płytę modelową, 4- wypełnienie skrzyni piaskiem oraz wstrząsanie wibracyjne - zwiększenie gęstości pozornej piasku, 5- nałożenie folii na formę, 6- odessanie powietrza ze skrzyni formierskiej i jednocześnie rozszczelnienie płyty modelowej, zdjęcie skrzyni z płyty modelowej, 7- złożenie formy, 8- wybicie po zalaniu formy[27].

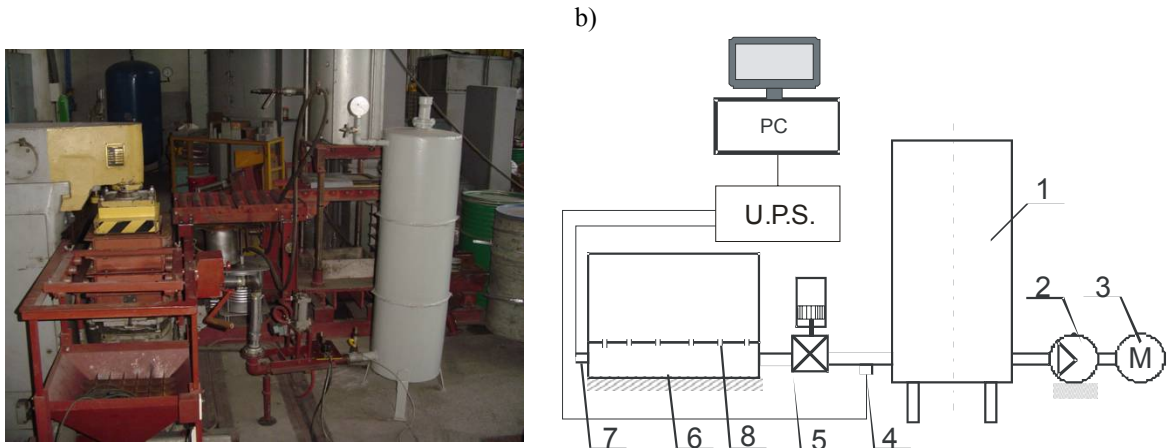
2.4 Badania wstępne procesu podciśnieniowego

Autor niniejszej rozprawy przeprowadził wstępne badania procesu podciśnieniowego o charakterze przygotowawczym do podjęcia tematyki w pracy doktorskiej [43,50,52,53,54,57,58]. Badania te miały potwierdzić potrzebę stworzenia podstaw naukowych procesu formowania podciśnieniowego jako etapu wstępnego zagęszczania masy formierskiej. W programie badań, zaprojektowano i wykonano dwa stanowiska badawcze, które umożliwiły przeprowadzenie procesu zagęszczania masy wraz z rejestracją przebiegu procesu.

Badania prowadzono na stanowiskach wykonanych w Katedrze Mechanizacji, Automatykacji i Projektowania Odlewni. Stanowiska podzielono na dwie grupy; pierwsza do badań modelowych (rys. 12a), druga jako stanowisko prototypowe wyposażone w formierkę FKT 54 wyposażoną w instalację podciśnieniową (rys. 12b).



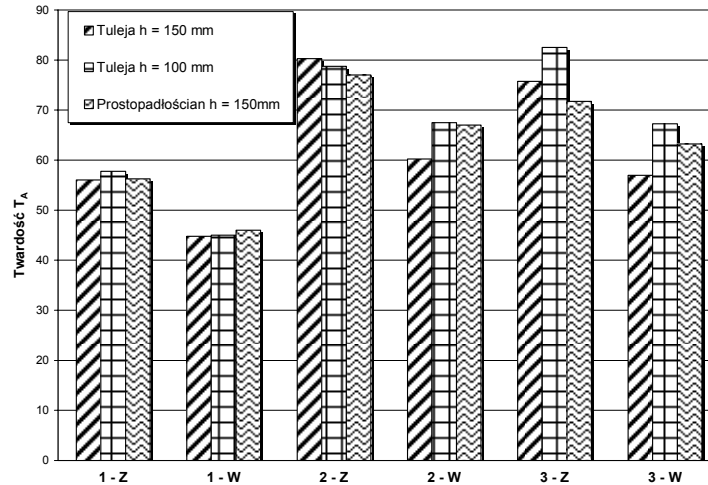
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 12. Widok i schemat prototypowego stanowisk do badań procesu formowania podciśnieniowego: a) modelowe, b) prototypowe na bazie formierki FKT 54; 1- zbiornik podciśnieniowy, 2- pompa próżniowa z napędem, 3- silnik, 4 i 7- czujniki ciśnienia, 5- zawór, 6- skrzynka formierska z nadstawką, 8- otwory odpowietrzające, 9 – forma z PMM

W badaniach wykorzystywano syntetyczną masę z bentonitem oraz pyłem węglowym, przeznaczoną dla odlewów żeliwnych. Średnie podstawowe właściwości masy to: $R_c^w = 0,12 \text{ MPa}$, $p^w = 2,04 \text{ m}^2/\text{MPa}\cdot\text{s}$, $W=3,5 \%$. Pomiary twardości oraz wytrzymałości form przeprowadzono twardościomierzami typu A, C (ZD IO Kraków) oraz przyrządem PVP (Georg Fisher).

Stanowisko do badań modelowych umożliwiło przeprowadzanie badań zarówno w procesach zagęszczania z transportem masy do przestrzeni technologicznej (odmiana procesu dmuchowego), jak również badań procesów zagęszczania podciśnieniowego bez transportu masy. Ideą badań było sprawdzenie możliwości wspomagania procesu zagęszczania prasowaniem, w trudnych technologicznie szczelinach modeli. Przykładowe wyniki tej serii badań przedstawiono na wykresie (rys. 13).



Rys. 13. Wyniki pomiarów twardości T_A w formach zagęszczanych: podciśnieniowo - 1, podciśnieniowo z doprasowaniem - 2 oraz prasowaniem - 3; obszary pomiaru twardości: Z- obszar na zewnątrz obrysu modelu, W- obszar wewnątrz obrysu modelu

Analiza wyników potwierdziła korzystny wpływ podciśnieniowego zagęszczania wstępnego na osiągane efekty końcowe formowania (po doprasowaniu); nieco wyższe wartości twardości formy na zewnątrz modelu (obserwowano również mniejsze odchylenia od wartości średniej), w porównaniu do form zagęszczanych samym prasowaniem [57]. Istotny efekt procesu to zauważalny wzrost twardości w obszarze modelu. W badaniach wykorzystano trudne technologicznie modele o dużej smukłości wnęki wewnętrznej ($h/d \sim 3$).

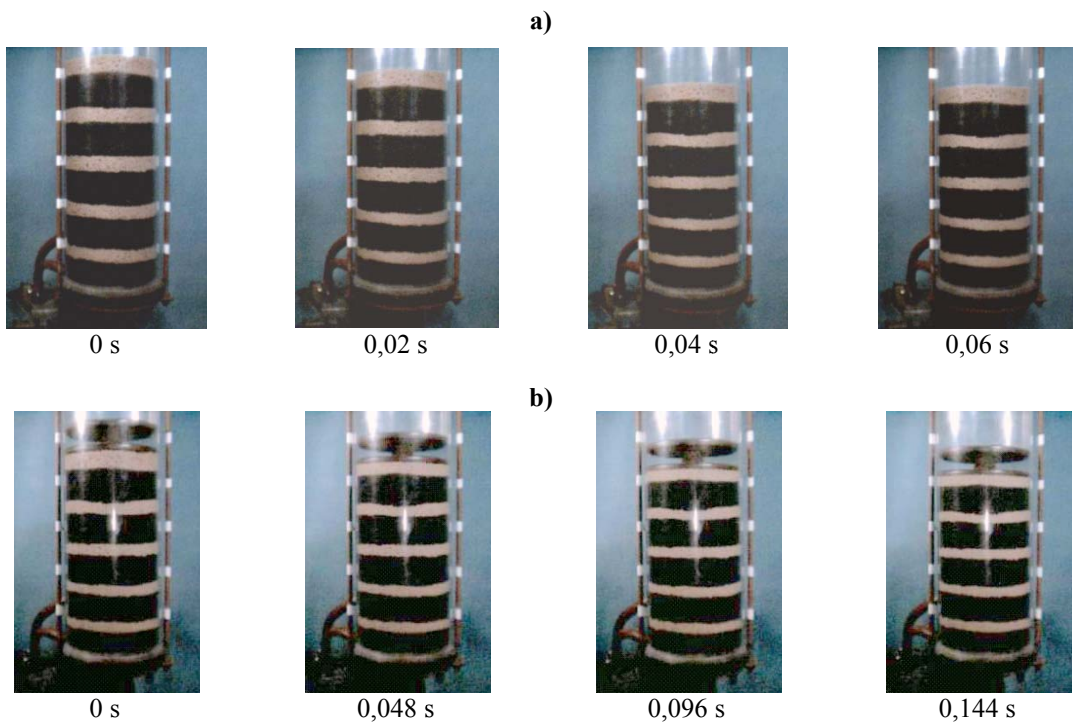
W metodyce badań i oceny zastosowano typowe metody pomiaru twardości i gęstości form [23,45] jako główne pozycje oraz dodatkowo: nacisk prasujący, przemieszczanie warstw zagęszczanej masy, ciśnienie nad masą [6,26,28,43].

Niezależnie od ilościowej oceny efektów zagęszczenia, przeprowadzono ocenę jakościową, metodą wizualnego rejestrowania; metoda fotografii form wykonanych z mas barwionych o ułożeniu warstwowym. Trudniejszym zagadnieniem jest wizualizacja przebiegu procesów prowadzona techniką szybkiego filmowania. Historycznie do zastosowania tej metody badawczej były szybkie kamery mechaniczne. Obecnie stosowane są kamery cyfrowe [49,63]. Ich dużą zaletą jest łatwiejsze opracowanie wyników rejestracji dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

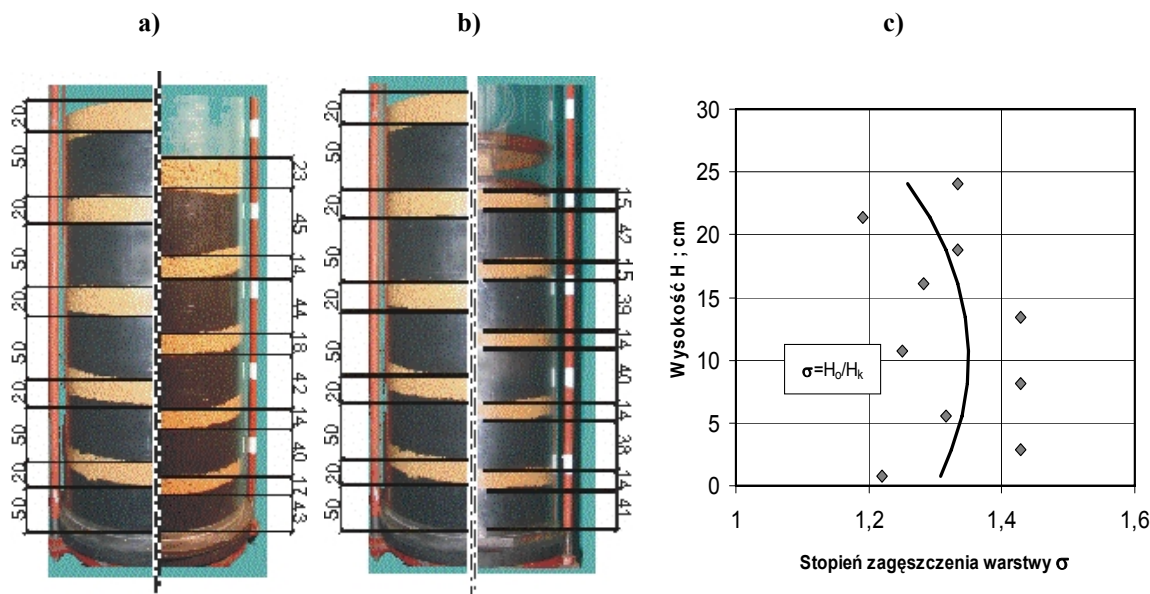
W omawianych badaniach rejestrację procesu wykonano szybką kamerą FASTCAM Super 10KC.

Na rysunku 14 przedstawiono wybrane fazy różnych wariantów zagęszczania podciśnieniowego, z masą o różnym (kontrastowym) zabarwieniu.



Rys. 14. Wizualizacja dwustopniowego procesu zagęszczania podciśnieniowego: a) wstępne zagęszczanie podciśnieniowe, b) doprasowanie podciśnieniowe krążkiem

Z kolei na rysunek 15 przedstawiono stan przed i po procesie zagęszczania w dwóch wariantach procesu; zagęszczania podciśnieniowego masy i doprasowania z zastosowaniem krążka swobodnie położonego na wierzchniej warstwie słupa masy. Zdjęcia wykonano standardowym aparatem cyfrowym.



Rys. 15. Stan przed i po procesie zagęszczania podciśnieniowego; zdjęcia wykonane aparatem cyfrowym.

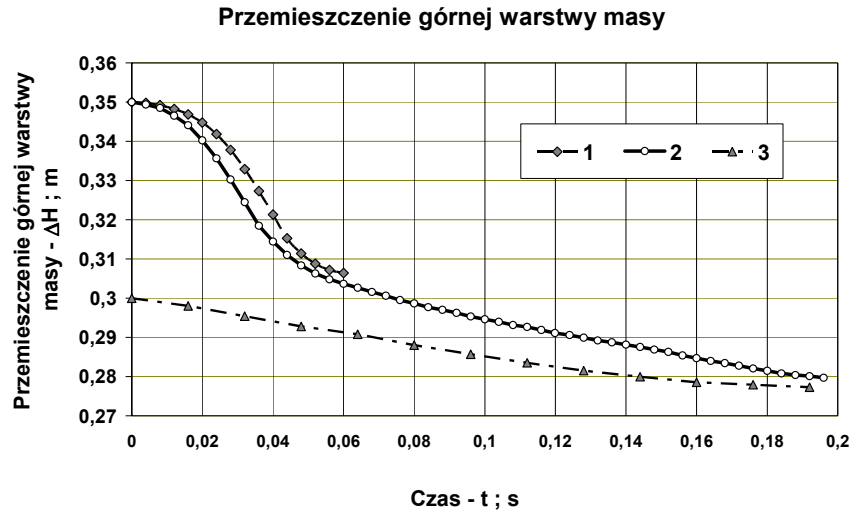
Na podstawie materiałów filmowych, opracowano wykresy w funkcji wysokości i podciśnienia (rys. 16).

Zastosowanie szczelnego krążka ułożonego na powierzchni masy umożliwiło uzyskanie dogęszczenia górnych warstw masy [51]. Końcowy efekt zagęszczania był podobny zarówno w jednostopniowym zagęszczaniu podciśnieniowym z krążkiem jak i w procesie dwustopniowym: zagęszczenie podciśnieniowe z następnym doprasowaniem podciśnieniowym przy użyciu krążka.

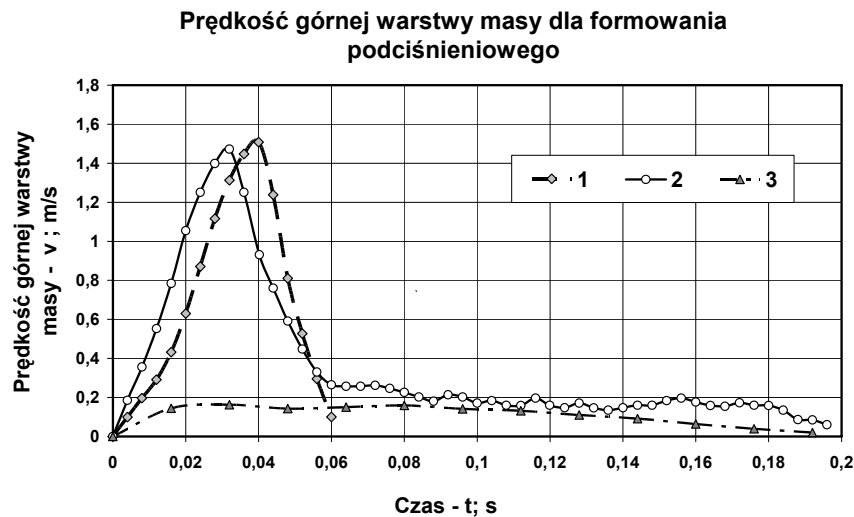
Badania procesu formowania prowadzone na omawianym stanowisku prototypowym (rys.12) wykazały korzystny wpływ wstępnego zagęszczania podciśnieniowego [50].

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

a)



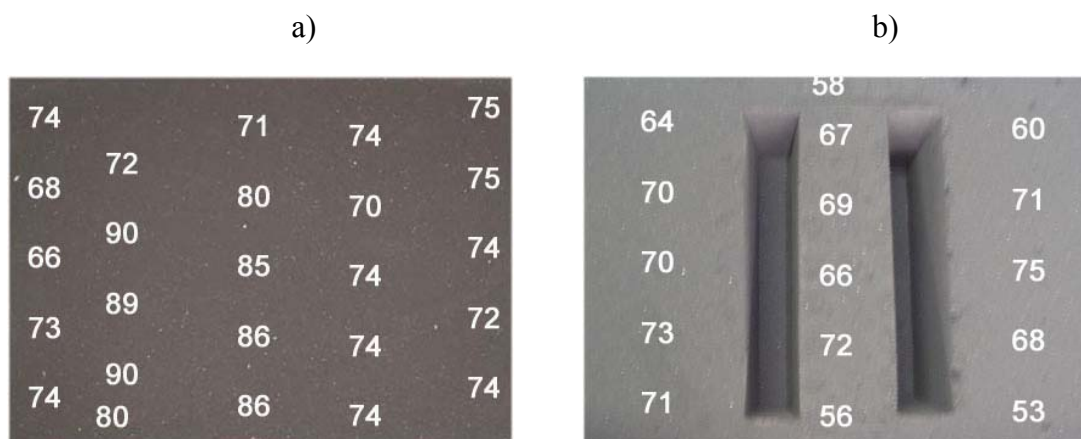
b)



Rys. 16. Przeszczenie- a) oraz prędkość- b) górnej warstwy masy w wybranych wariantach formowania podciśnieniowego; 1- zagęszczanie podciśnieniowe, 2- prasowanie podciśnieniowe- krążkiem, 3- proces dwustopniowy: prasowanie podciśnieniowe, doprasowanie podciśnieniowe krążkiem

Na rysunku 17 zamieszczono przykładowe efekty formowania podciśnieniowego z doprasowaniem (w zakresie niskich nacisków prasujących) uzyskane przy określonym zestawie modelowym (modele o dużej smukłości). Formy wykonane w tych samych warunkach jedynie prasowaniem wykazywały znacznie słabsze zagęszczenie – zwłaszcza w obszarze pomiędzy modelami. Przeprowadzone badania wykazały możliwość dalszej optymalizacji konstrukcji prototypowego stanowiska,

z czym można wiązać możliwość poprawy efektów wstępnego formowania podciśnieniowego.



Rys. 17. Przykładowe rezultaty formowania uzyskane w procesie formowania podciśnieniowego z doprasowaniem; stanowisko prototypowe; a) górna powierzchnia półformy, b) dolna powierzchnia półformy

Zaprezentowane w zarysie rezultaty badań wybranego wariantu zagęszczania podciśnieniowego świadczą o jego przydatności jako metody wstępnego zagęszczania. Zastosowanie instalacji podciśnieniowej może rozszerzyć zakres możliwości technologicznych obecnie użytkowanych maszyna. Dotyczy to zwłaszcza poprawy efektów zagęszczania w przypadku stosowania skomplikowanych modeli. Zastosowana technika badawcza obejmująca wizualizację procesu zagęszczania i dynamiczne pomiary podstawowych wielkości pozwoli na wyjaśnieniu mechanizmu procesu zagęszczania, a w konsekwencji optymalizację konstrukcji zespołu podciśnieniowego formierki.

Badania wstępne potwierdziły konieczność rozwinięcia badań umożliwiających dokładne poznanie mechanizmu procesu formowania podciśnieniowego.

3. Analiza istniejących modeli opisujących procesy dmuchowe

Procesy wywołane przepływem strumienia powietrza, bez względu na wartość ciśnienia lub podciśnienia, dokonują się w ściśle określonej instalacji. Zasadniczymi elementami składowymi instalacji przeznaczonej do procesów zagęszczania masy są:

- źródło wytwarzania „powietrza” wraz z instalacją rurową,
- zbiornik wyrównawczy w przypadku procesu nadciśnieniowego lub zbiornik próżniowy w procesie podciśnieniowym,
- zbiornik wewnętrzny maszyny wypełniony masą lub zamiennie komora nabojowa,
- forma lub rdzennica określona jako przestrzeń technologiczna do zagęszczenia masy.

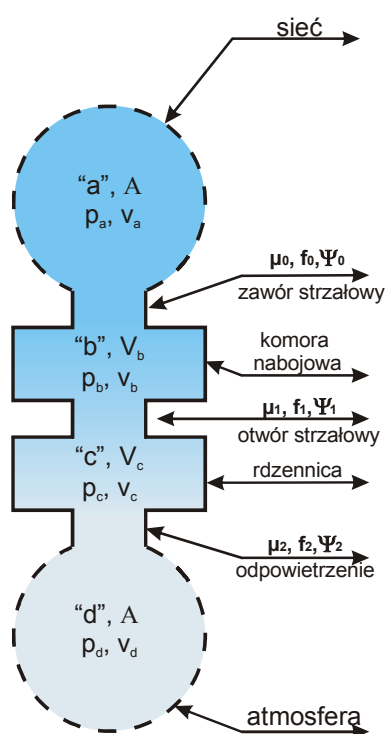
Pod względem eksploatacyjnym, a głównie dla celów analityczno modelowych przyjmuje się, że początkiem instalacji jest źródło powietrza, a końcem odbiornik (skrzynka formierska z modelem lub rdzennica) przejmujący energię przepływu strumienia powietrza. Pomiedzy źródłem, a odbiornikiem występują elementy, które w decydujący sposób wpływają na dynamikę procesu przepływu strumienia. Każdy z tych elementów jest charakteryzowany parametrami konstrukcyjnymi np. instalacja rurowa – średnica, powierzchnia przekroju rzeczywistego, długość; zawory impulsowe – przekrój kanału przelotowego, szybkość otwierania; komory wewnętrzne – objętość [6,35,52].

Natomiast parametrami eksploatacyjnymi są: wartość ciśnienia powietrza, jego szybkość narastania lub obniżania się, a także wydatek masowy. Wymienione parametry wpływają na efekt dynamiczny procesu przepływu strumienia powietrza.

Z wymienionych względów zachodzący proces przepływu ma charakter złożony w którym zachodzące zjawiska mają charakter zmienny często probabilistyczny. Skuteczną metodą teoretyczno-analityczną badania procesów jest metoda

modelowania, której podstawą w pierwszej kolejności jest model procesu przepływu, a w drugiej model instalacji jako elementów materialnych.

Wśród pierwszych prac dotyczących zagadnień modelowania procesów przepływu w maszynach zagęszczających masę strumieniem powietrza należy wymienić analizę procesu dmuchowego przeprowadzoną przez P.N. Aksjonova [1]. Podstawę rozważań stanowił model przedstawiony na rysunku 18. Funkcją celu w modelu Aksjonowa było określenie przyrostu masy powietrza w danym okresie czasu w przestrzeni roboczo-technologicznej. Przestrzeń tworzyły dwie komory – nabojowa (robocza) i rdzennica (technologiczna), połączone ze sobą poprzez głowicę z otworem dmuchowym.

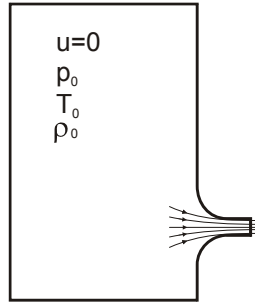


Rys. 18. Klasyczny model obliczania strumienia powietrza w maszynach dmuchowych wg Aksjonowa [1]: a- zbiornik wewnętrzny maszyny (jako sieć), p- przestrzeń przyzaworowa, b- komora nabojowa, c- rdzennica, d- atmosfera, μ, ψ, f – wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.

W modelu tym, zastosowano równanie Saint Venant'a- Wantzela do obliczeń przyrostu masy powietrza w przestrzeni maszyny dmuchowej, intensywności

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

wzrostu ciśnienia i jego przebiegu w funkcji czasu [6,36]. Schematycznie model ten przedstawiono na rysunku 19.



Rys. 19. Wyływ powietrza (gazu) ze zbiornika [36]

Postać równania dla przedstawionego modelu, opisująca prędkość wypływu u_k z komory jest następująca [35]:

$$u_k = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2)$$

gdzie:

p_0 -ciśnienie spiętrzenia panujące w zbiorniku

ρ_0 - gęstość gazu w zbiorniku

p_k - ciśnienie w przekroju wypływu

κ - wykładnik adiabaty

Wydatek masowy wypływu powietrza przez otwór wyraża się wzorem

$$G = \rho_k u_k A_k \quad (3)$$

gdzie:

ρ_k - gęstość gazu w przekroju wylotu

u_k - prędkość w przekroju wylotu

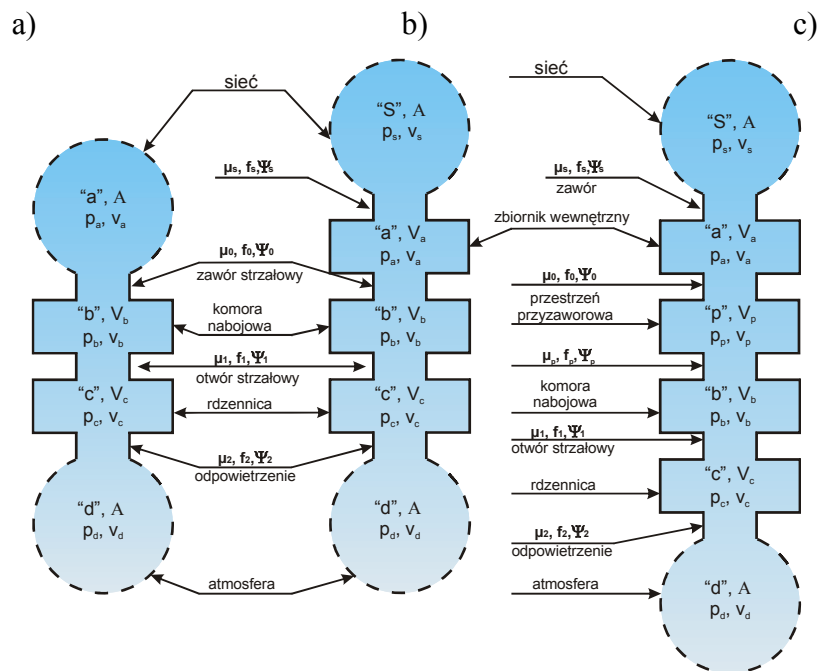
A_k - przekrój wylotu

Podstawiając zależność (2) do wzoru (3) otrzymamy strumień masy gazu wypływającego przez dyszę:

$$G = A \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (4)$$

Sposób obliczeń podany przez Aksjonowa zawiera szereg założeń uproszczających [1,6]. Zastosowane przez niego uproszczenia, takie jak założenie o nieograniczonej objętości wewnętrznego zbiornika ciśnienia maszyny, pominięcie jego zasilania z sieci sprężonego powietrza, przyjęcie stałych wartości współczynników natężenia wypływu pomiędzy poszczególnymi przestrzeniami oraz założenie o natychmiastowym otwarciu zaworu powietrznego do pełnej powierzchni przekroju, wykluczają jego szersze zastosowanie [6].

W celu wyeliminowania niedoskonałości w założeniach Aksjonowa, kolejny autor J. Dańko [6] zaproponował modele rozszerzone do obliczania strumieni powietrza w maszynach dmuchowych rys. 20b oraz rys. 20c. Autor uwzględnił ograniczoną objętość zbiornika wewnętrznego maszyny oraz zmienną wartość ciśnienia w czasie w zbiorniku w stosunku do ciśnienia panującego w sieci.



Rys. 20. Modele obliczania strumieni powietrza w maszynach dmuchowych [6]: a) klasyczny-Aksjonowa; b) rozszerzony dla nadmuchiwarek wg J. Dańko; c) rozszerzony dla strzelarek, wg J. Dańko. Oznaczenia: s- sieć sprężonego powietrza, a- zbiornik wewnętrzny maszyny (w klasycznym modelu Aksjonowa - sieć), p- przestrzeń przyzaworowa, b- komora nabojowa, c- rdzennica, d- atmosfera, μ, ψ, f – wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Istotą w prezentowanych modelach jest wprowadzenie dodatkowego stopnia przepływu powietrza z sieci do zbiornika wewnętrznego o określonej objętości. Chwilowy przepływ masy powietrza i jego zmiany w przestrzeniach a, b i c opisują zależności podane wzorami (5, 6, 7) [6]:

$$dG_a = \left(\mu_s \cdot f_s \cdot \psi_s \cdot \sqrt{\frac{p_s}{V_s}} - \mu_0 \cdot f_0 \cdot \psi_0 \cdot \sqrt{\frac{p_a}{V_a}} \right) d\tau \quad (5)$$

$$dG_b = \left(\mu_0 \cdot f_0 \cdot \psi_0 \cdot \sqrt{\frac{p_a}{V_a}} - \mu_1 \cdot f_1 \cdot \psi_1 \cdot \sqrt{\frac{p_b}{V_b}} \right) d\tau \quad (6)$$

$$dG_c = \left(\mu_1 \cdot f_1 \cdot \psi_1 \cdot \sqrt{\frac{p_s}{V_s}} - \mu_2 \cdot f_2 \cdot \psi_2 \cdot \sqrt{\frac{p_c}{V_c}} \right) d\tau \quad (7)$$

gdzie:

f - powierzchnie przekroju przewodu (sieciowego-s, zaworu powietrznego-0, otworu wylotowego z głowicy dmuchowej-1, sumaryczna otworów odpowietrzających-2)

p – ciśnienie absolutne w przestrzeniach „a”, „b”, „c”

ψ – liczby przepływu

μ - współczynniki wydatku otworów na kolejnych stopniach przepływu powietrza

Uwzględniając założenia modelu rozszerzonego opisanego równaniami (5, 6, 7) oraz intensywność zmiany ciśnienia w przestrzeni „a”, otrzymuje się zależność charakteryzującą przebieg procesu dmuchowego. Tą wielkością jest szybkość narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej [6]:

$$\frac{dp_a}{d\tau} = \frac{\kappa \cdot p_s^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v_s}{V_a} \cdot p_a^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot \left(\mu_s \cdot f_s \cdot \Psi_s \cdot \sqrt{\frac{p_s}{v_s}} - \frac{\mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0}{\sqrt{p_s^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v}} \cdot \sqrt{p_a^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \right) \quad (8)$$

gdzie:

p_a – ciśnienie powietrza w przestrzeni technologicznej (do rozprężenia),

κ – wykładnik adiabaty,

p_s – ciśnienie w zbiorniku,

v_s – objętość właściwa powietrza w przestrzeni technologicznej,

V_a – objętość przestrzeni technologicznej,

μ_s – współczynnik przepływu dla zaworu,

f_s – przekrój poprzeczny zaworu,

Ψ_s – funkcja wypływu sprężonego powietrza z zaworu,

v – objętość właściwa sprężonego powietrza w zbiorniku,

μ_0 – współczynnik przepływu przez otwory odpowietrzające,

f_0 – przekrój poprzeczny otworów odpowietrzających,

Ψ_0 – funkcja wypływu sprężonego powietrza z otworów odpowietrzających,

t – czas.

Określona wzorem (8) intensywność zmiany ciśnienia (dla skończonej małej przedziałów czasu Δt) wskazuje, że wartość ciśnienia p_a uwzględnia:

- wpływ objętości V_a i jego zasilanie sprężonym powietrzem z sieci
- ubytek powietrza odprowadzanego do elementów układu przez zawór strzałowy

W elementach wzoru (8), dotyczących pozostałych przestrzeni układu występują współczynniki natężenia wypływu powietrza, wyrażone ilorazem rzeczywistego wydatku objętościowego do wydatku teoretycznego [6].

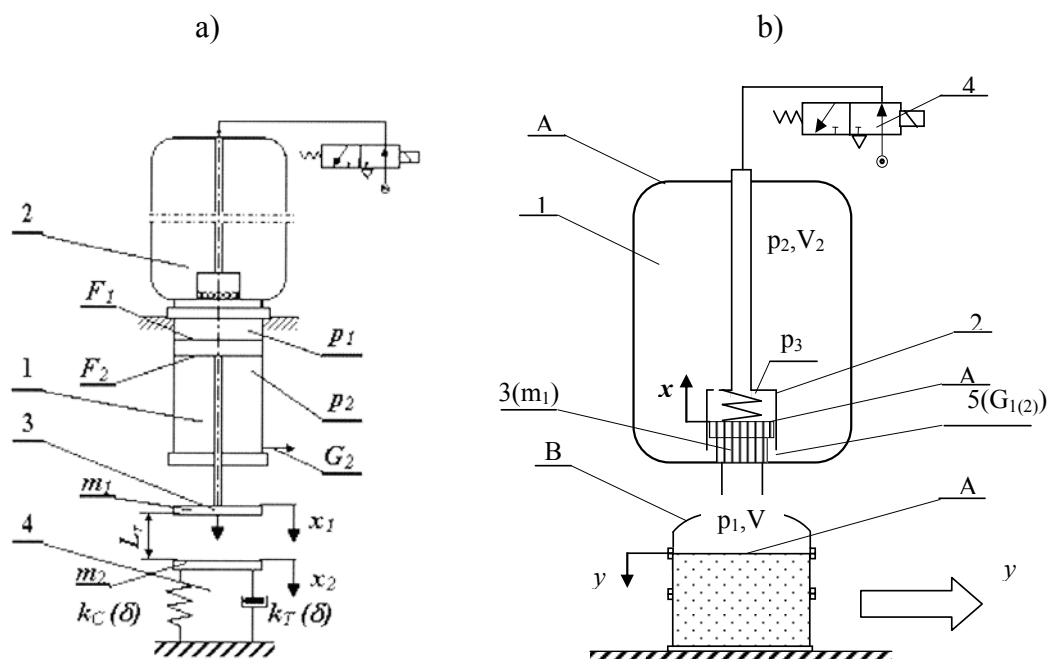
W grupie publikacji dotyczących procesów dmuchowych na uwagę zasługuje pozycja [2] opracowana przez J. Basta. Treścią jej jest aplikacja zależności wyprowadzonej przez Aksjonowa do opisu procesu Seiatsu. Proces ten polega na zagęszczaniu masy formierskiej strumieniem powietrza o niedużej prędkości narastania, rzędu kilku MPa/s. W procesie strumieniowym o małej dynamice

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

sterowanie przebiegiem zagęszczania odbywa się głównie przez dobór umiejscowienia i wielkości odpowietrzeń (pełniących kluczową rolę w tej metodzie zagęszczania) [41].

Do opisu procesu impulsowego [14,19,29,38,40], a także dynamicznego prasowania [31,32,33] często stosowano modele przepływu quasi-ustalonego zdefiniowanego przez E.W. Gerc [14], zachodzącego w odmiennych konstrukcyjnie elementach pneumatycznych. Spośród wspomnianych modeli na uwagę zasługują modele opracowane przez I.V. Matwiejkenę, T. Mikulczyńskiego, G.M. Orłowa, K. Smyksego [3,5,7,14,19,29,30,38].

Zespół autorów (T. Mikulczyński wraz z współautorami [13,14,22]) w oparciu o powyższą teorię zaproponował opis procesów przepływu zarówno w formierkach impulsowych jak i w formierce dynamicznie prasującej. Model takiej formierki przedstawiono na rysunku 21.



Rys. 21 Schemat procesów: a) dynamicznego prasowania masy formierskiej [12]: 1- napęd pneumatyczny, 2-zbiornik akumulacyjny, 3- płyta prasująca, 4-model reologiczny masy formierskiej; b) impulsowego zagęszczania masy formierskiej [22]: A- głowica impulsowa, 1- zbiornik akumulacyjny, 2- samoczynny zawór impulsowy, 3- tłok zaworu, 4- zawór rozdzielający, 5- otwór wylotowy, B- skrzynka formierska

Wybrane równania charakteryzujące procesy przepływu przez głowicę w formierce dynamicznie prasującej (rys. 21a) i przestrzeni technologicznej w maszynie impulsowej (rys. 21b) uzupełnione równaniem ruchu zaworu, podano w zależnościach (9-11) [12,15,31]:

$$m_3 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = F_3(p_0 - p_3) - c \cdot (y + y_0) - m_3 \cdot g \quad (9)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\kappa}{x} \cdot \left(\frac{G_0 R \cdot T_0}{F_1} - p_1 \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (10)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\kappa}{s-x} \left(p_2 \frac{dx}{dt} - \frac{G_2 R \cdot T_2}{F_2} \right) \quad (11)$$

w których:

m_3 - masa elementów ruchomych zaworu impulsowego,

x – współrzędne położenia tłoka napędu,

y - współrzędne położenia tłoka zaworu impulsowego,

y_0 - ugięcie wstępne sprężyny (montażowe),

c - stała sprężyny,

p_0, p_1, p_2, p_3 – ciśnienie absolutne odpowiednio w komorach: zbiornika akumulacyjnego, roboczej, powrotnej cylindra napędu szybkobieżnego oraz powrotnej zaworu impulsowego,

F_1, F_2 – przekroje tłoka po stronie roboczej i powrotu napędu,

F_3 – przekrój tłoka zaworu impulsowego,

g – przyspieszenie ziemskie,

s – skok tłoka napędu,

G_i – natężenie wypływu powietrza z i -tej komory,

T_i – temperatura powietrza w danej komorze

Do obliczenia teoretycznej wartości spadku ciśnienia czynnika gazowego przepływającego przez ośrodek porowaty stosowne równanie (12) wyprowadzili

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

S. Ergun i A. Orning, będące najogólniejszą, a zarazem najdokładniejszą funkcją przepływu. Według tej funkcji można określić spadek ciśnienia gazu przy jego przepływie przez wypełnienie ziarniste, słuszne dla całego zakresu przepływu [34]:

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{v_0 \cdot \mu (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \cdot \varepsilon^3} + 1,75 \frac{\rho_g \cdot v_0 (1 - \varepsilon)}{d \cdot \varepsilon^3}, \text{ Pa/m} \quad (12)$$

gdzie:

Δp – gradient ciśnienia, Pa,

H – wysokość warstwy materiału ziarnistego, m,

μ - lepkość dynamiczna gazu,

ρ_g – gęstość czynnika fluidyzującego, kg/m^3 ,

v_0 – prędkość czynnika, m/s,

d – średnica ziaren, m,

ε - porowatość warstwy.

Wartość gradientu ciśnienia zależy od sumy gęstości czynnika fluidyzującego ośrodek porowaty i lepkości dynamicznej gazu. Zmniejszenie porowatości w trakcie zagęszczania podciśnieniowego będzie prowadziło do wzrostu gradientu ciśnienia na warstwie zagęszczonej masy (przy założeniu $v_0 = \text{const}$) [10].

Przeprowadzona analiza wykazała, że wszyscy Autorzy w swoich rozważaniach bazowali na podstawowym równaniu przepływu Saint Venant'a- Wantzela. Postęp w doskonaleniu modeli polegał na uwzględnieniu w opisie zagadnień przypisanych do konkretnego procesu technologicznego. W zależności od szczegółowości identyfikowania elementów tworzących instalację technologiczną, postać modeli miała cechy na tyle ogólne, aby można było prowadzić adaptację do warunków innych, jakie mogą wystąpić w rozwiązaniach konstrukcyjno-przemysłowych.

Ponieważ proces podciśnieniowy jest procesem odwrotnym do procesu nadciśnieniowego, to główne zasady tworzenia modelu będą obowiązywały przy opracowaniu własnego modelu [58]. Częściowo również pewne założenia przyjęte przez autorów omawianych modeli będą wzorem do przygotowania modelu do procesu podciśnieniowego.

4. Synteza własnego modelu przepływu strumienia powietrza w procesie podciśnieniowym

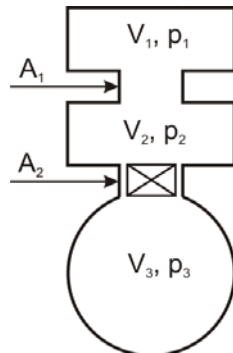
4.1 Założenia procesowe do modelu przepływu

Podstawowymi założeniami jest przyjęcie schematu ideowego instalacji podciśnieniowej, w której uwzględniono:

- zbiornik wewnętrzny połączony z pompą wytwarzającą podciśnienie
- zawór impulsowy – podciśnieniowy
- przestrzeń zamkniętą pod płytą modelową
- płytę modelową z kanałami przepływowymi łączącymi przestrzeń technologiczną
- przejście do atmosfery łączące z komorą technologiczną

Komora wewnętrzna pełni rolę źródła energii podciśnieniowej wytwarzanej przez pompę. Komora z jednej strony jest podłączona do pompy podciśnieniowej, a z drugiej zamknięta zaworem impulsowym. Parametrami określającymi komorę podciśnieniową jest objętość V_3 oraz ciśnienie p_3 . Zawór podciśnieniowy (powierzchnia A_2) pełni rolę zaworu impulsowego, którego otwarcie rozpoczyna proces formowania. Zawór łączy przestrzeń pod płytą modelową z instalacją podciśnieniową. Przestrzeń ta umożliwia przepływ powietrza od kanałów odpowietrzających (rozmieszczonych na płycie modelowej) do przestrzeni instalacji podciśnieniowej. Parametrami przestrzeni pod płytą modelową są objętość V_2 oraz ciśnienie p_2 . Połączona jest ona z przestrzenią technologiczną poprzez powierzchnię przelotową A_1 , którą jest płyta modelowa wyposażona w kanały odpowietrzające. Ostatnim elementem modelu jest przestrzeń technologiczna formy, o objętości V_1 i ciśnieniu p_1 , bezpośrednio połączona z atmosferą. Na rysunku 22 przedstawiono uproszczony model omawianej instalacji podciśnieniowej.

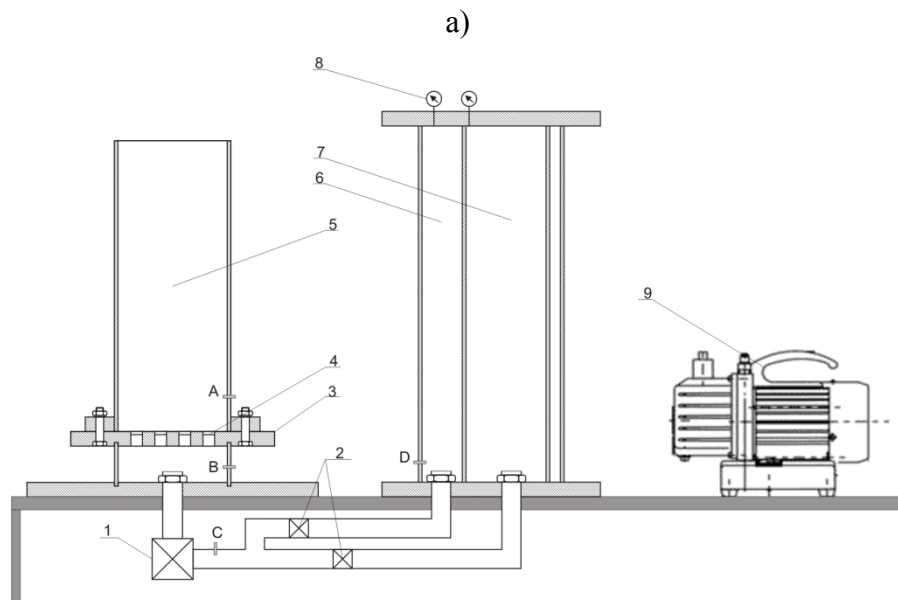
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



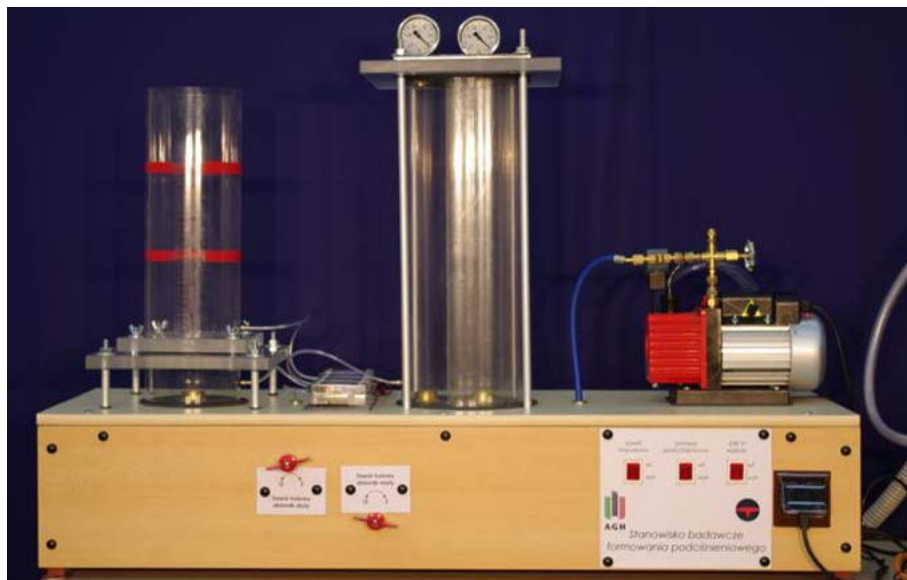
Rys. 22. Uproszczony model formierki podciśnieniowej wykorzystany w opisie procesu przepływu powietrza w przestrzeniach stanowiska modelowego.

4.2 Model przepływu

Na podstawie założeń i wniosków wynikających z rozdziału 3 postać analityczna modelu dla procesu podciśnieniowego została opracowana na podstawie układu graficznego instalacji odpowiadającej prawdopodobnej konstrukcji – rys 23a, która jest podstawą modelu fizycznego – laboratoryjnego – rys. 23b.

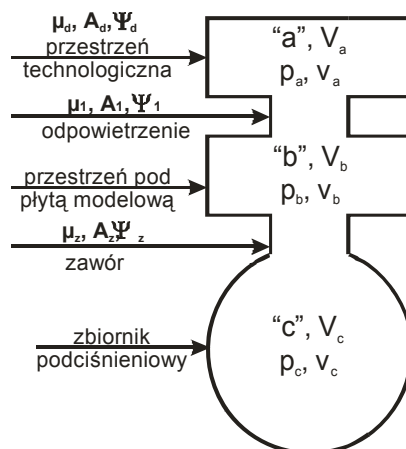


b)



Rys. 23. Układ instalacji do modelowania procesu formowania podciśnieniowego: a – schemat instalacji, b – widok modelu laboratoryjnego; 1- zawór impulsowy, 2- zawory kulowe, 3- płyta modelowa, 4- korki odpowietrzające, 5- forma z polimetakrylanu metylu (PMMA), 6- zbiornik podciśnieniowy (duży) z PMMA, 7- zbiornik podciśnieniowy (mały) z PMMA, 8- wakuometry, 9- pompa próżniowa.

Wzorując się na modelach Aksjonowa [1] oraz rozszerzonych modelach J. Dańki [6] oraz na opisie poszczególnych elementów układu zaproponowanym przez Autorów analizowanych prac stworzono własny model instalacji formierki podciśnieniowej. Model autorski – własny przedstawiono na rysunku 24.



Rys. 24. Model procesu przepływu w instalacji formierki podciśnieniowej [opracowanie własne]

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Do opisu procesu przepływu powietrza w instalacji podciśnieniowej wykorzystano teorię jednowymiarowego przepływu quasi-ustalonego E.W. Gerc [16] szeroko wykorzystywanej w obliczeniach pneumatycznych [4,19,20,21]. Ogólne równania bazujące na powyższej teorii, zastosowane do opisu procesów przepływu w przestrzeniach impulsowych maszyn formierskich, podano w publikacji K. Smyksego [42]. Postać równań jest następująca:

$$\kappa R \left(\sum_{k=1}^n T_{i,k} dm_{i,k} - \sum_{l=1}^m T_{j,l} dm_{j,l} \right) = V_j dp_j + \kappa p_j dV_j \quad (13)$$

$$R \left[m_j dT_j + T_j \left(\sum_{k=1}^n dm_{i,k} - \sum_{l=1}^m dm_{j,l} \right) \right] = V_j dp_j + p_j dV_j \quad (14)$$

gdzie:

p_j, V_j – odpowiednio ciśnienie i 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 - zmiana masy powietrza w analizowanej przestrzeni związany z dopływem lub odpływem powietrza.

Ogólne równania (13) i (14) opisują zmiany ciśnienia i temperatury w każdej przestrzeni (zarówno o stałej, jak i zmiennej objętości) maszyny.

Powyższe równania muszą być uzupełnione równaniami ruchu elementów powodujących zmianę objętości analizowanej przestrzeni oraz równaniami ruchu zaworu. Łączna liczba równań opisujących proces jest zależna od złożoności modelu wyrażającą się ilością występujących w nim przestrzeni odnośnej instalacji.

W modelu opisującym proces przepływu powietrza w procesie podciśnieniowym założono stałą objętość analizowanych przestrzeni oraz wstępnie założono stałą temperaturę. Wprowadzone założenia skutkują pominięciem ostatniego członu w równaniu (13) oraz pominięciem równania (14). Obliczenia według przemiany izotermicznej umożliwiają określenie górnej wartości granicznej czasu opróżniania

przestrzeni technologicznej. Opis własny uwzględnia natężenie strumienia powietrza oraz dynamikę zaworu podciśnieniowego.

Procedurę budowania modelu przeprowadzono dla szczelnej, nienapełnionej masą formierską przestrzeni technologicznej z pominięciem procesu zagęszczania. Tego typu założenia (pominięcie procesu zagęszczania) ułatwiają ocenę intensywności procesu przepływu oraz określenie wpływu parametrów konstrukcyjnych na ten proces. Podobne założenia przyjęte zostały przez Autorów wyżej omawianych prac do oceny maszyn formierskich dmuchowych [1,6,35], strumieniowych [3] oraz impulsowych [40, 42] .

Model autorski składa się z 3 komór:

- 1) przestrzeni technologicznej, o objętości V_a i ciśnieniu p_a
- 2) przestrzeni pod płytą modelową, o objętości V_b i ciśnieniu p_b
- 3) zbiornika podciśnieniowego, o objętości V_c i ciśnieniu p_c

Wielkości charakteryzujące przepływ powietrza pomiędzy poszczególnymi komorami to μ, ψ, f .

W modelu przyjęto, że w analizowanej przestrzeni zmiany masy powietrza - $dm = Gdt$ związane z dopływem lub odpływem (w czasie $d\tau$) można wyrazić równaniem wykorzystującym chwilowe masowe natężenie strumienia G –uwzględniające prędkość wypływu wyliczoną z ogólnie znanego równania Saint Venant'a-Wantzela [52,56,57]. Uwzględniono możliwość wypływu czynnika zarówno w zakresie nadkrytycznym i podkrytycznym [35]. Zmianę powierzchni zaworu ujęto zlinearyzowanym równaniem (w funkcji czasu), co odpowiada przyjęciu stałej średniej prędkości przemieszczania trzpienia zaworu uwzględniającej katalogowy czas otwarcia zaworu.

Postać matematyczna tego modelu jest następująca:

$$-\kappa RT dm_{1/2} = V_1 dp_1 \tag{15}$$

$$\kappa RT (dm_{1/2} - dm_{2/3}) = V_2 dp_2 \tag{16}$$

$$\kappa RT dm_{2/3} = V_3 dp_3 \tag{17}$$

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

$$dm_{1/2} = G_{1/2} \cdot d\tau \quad (18)$$

$$dm_{2/3} = G_{2/3} \cdot d\tau \quad (19)$$

$$G_{1/2} = C_1 \cdot \mu_1 \cdot A_1 \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}, \quad \text{dla } \frac{p_2}{p_1} > 0,528 \quad (20)$$

$$G_{1/2} = C_2 \cdot \mu_1 \cdot A_1 \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T}}, \quad \text{dla } \frac{p_2}{p_1} \leq 0,528 \quad (21)$$

$$G_{2/3} = C_1 \cdot \mu_2 \cdot A_2 \cdot \frac{p_2}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}, \quad \text{dla } \frac{p_3}{p_2} > 0,528 \quad (22)$$

$$G_{2/3} = C_2 \cdot \mu_2 \cdot A_2 \cdot \frac{p_2}{\sqrt{T}}, \quad \text{dla } \frac{p_3}{p_2} \leq 0,528 \quad (23)$$

$$A_2(\tau) = a^* \tau \quad \text{dla } A_2(\tau) < A_2^{\max} \quad (24)$$

$$A_2(\tau) = A_2^{\max} \quad \text{dla } A_2(\tau) \geq A_2^{\max} \quad (25)$$

C_1, C_2 – stałe

gdzie:

$p_{1,2,3}$ – wartości ciśnienia powietrza w danej przestrzeni,

κ – wykładnik adiabaty,

$V_{1,2,3}$ – objętość danej przestrzeni,

$\mu_{1,2}$ - współczynniki przepływu, odpowiednio: dla odpowietrzeń i zaworu,

$A_{1,2}$ – powierzchnie przelotowe: odpowietrzeń i zaworu,

$dm_{i/j}$ – różniczkowa zmiana masy powietrza w danej przestrzeni,

$G_{i/j}$ – natężenia przepływu pomiędzy przestrzeniami,

T - temperatura,

τ – czas.

Poszczególne równania opisują:

- 15-17 równania ujmujące bilans energii [16] dla poszczególnych przestrzeni

- 18-19 równania opisujące natężenie strumienia masowego
- 20-23 równania ujmujące warunki przepływu w zakresie nadkrytycznym i podkrytycznym z uwzględnieniem równania Saint Venant'a-Wantzela
- 24-25 równania charakteryzujące zmianę powierzchni zaworu

Model umożliwia obliczenie szeregu parametrów procesu przepływu, między innymi: chwilowych wartości ciśnienia w określonych przestrzeniach, szybkości ich zmian, chwilowych wartości natężenia przepływu [42]. Analiza wyników symulacji może być wykorzystana do oceny parametrów formierki, jak również do ich prawidłowego doboru.

Model ten może być również rozszerzony o równania ujmujące procesy zagęszczania i filtracji powietrza w masie.

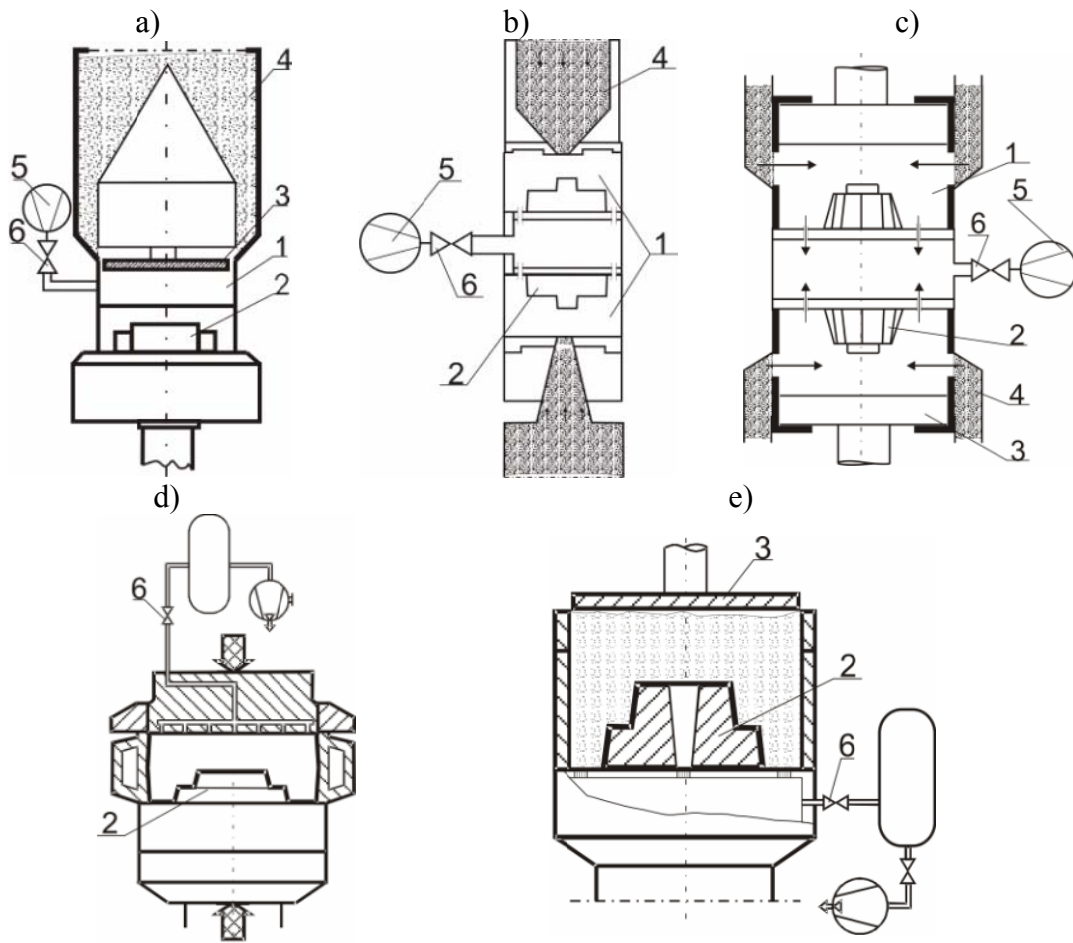
4.3 Porównanie modelu własnego z rozwiązaniami praktycznymi producentów maszyn

Z uwagi na stosowane w praktyce odmienne rozwiązania konstrukcyjne maszyn zagęszczających masę formierską procesem podciśnieniowym, podjęto próbę opisu ich działania według modelu opracowanego przez autora niniejszej rozprawy. Ponieważ praktyczne rozwiązania z dużym powodzeniem dają pozytywne efekty w zagęszczaniu form, istnieje realna możliwość zweryfikowania opracowanego modelu.

Punktem wyjścia do przyporządkowania modelu procesu przepływu powietrza do poszczególnych instalacji – maszyn formierskich podciśnieniowych, była analiza schematów tych maszyn. Analizie poddano następujące rozwiązania (rys. 25):

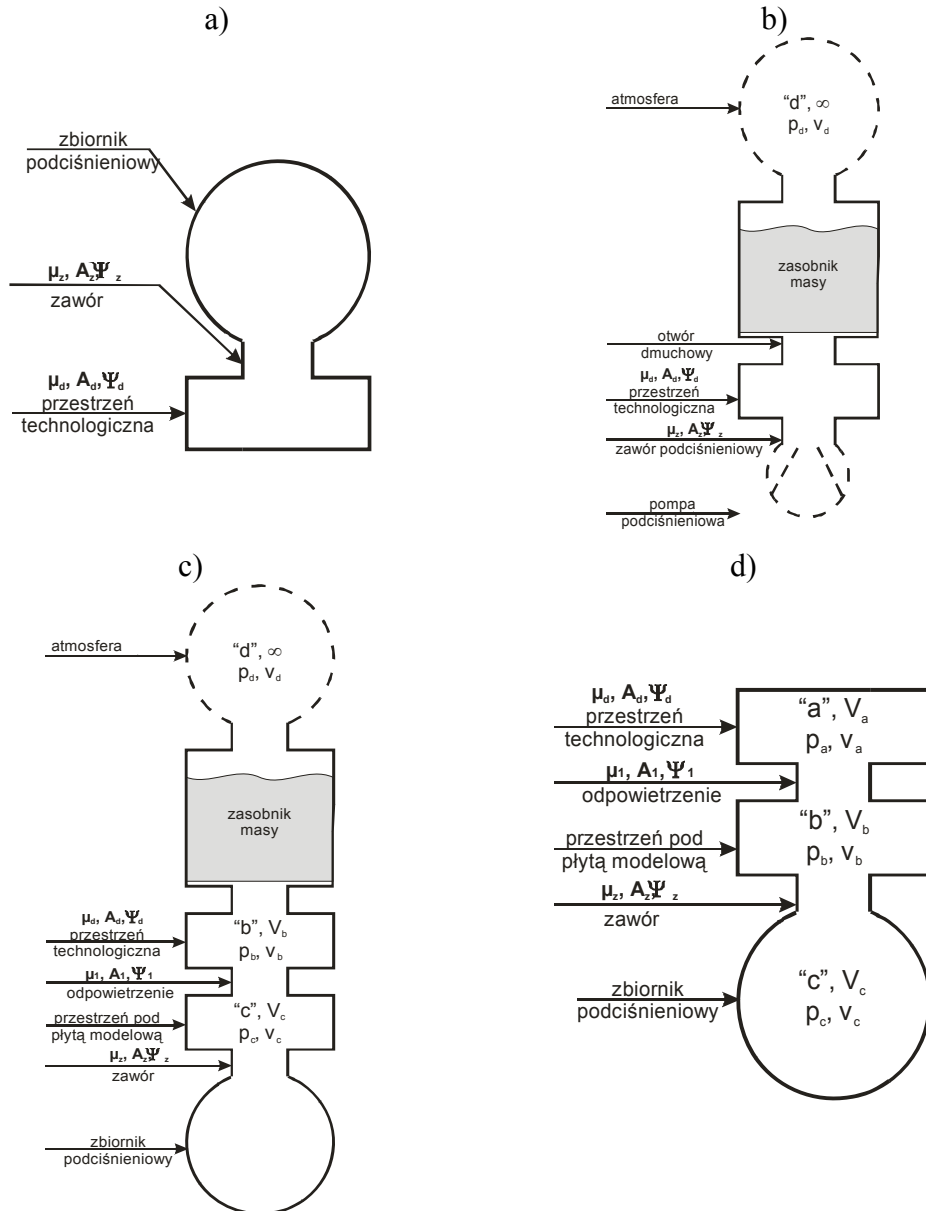
- a, d – firmy Künkel-Wagner – Niemcy
- b – Disa Group
- c – Haflinger
- e – model własny

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 25. Uproszczone schematy podciśnieniowych maszyn formierskich [27,58] : a), d) Künkel Wagner- odmiana systemu Vacupress; b) Disa Forma; c) Haflinger; e) odmiana procesu zrealizowana przez Autora; 1- przestrzeń technologiczna, 2- płyta modelowa, 3- płyta prasująca, 4- zbiornik masy, 5- system podciśnieniowy, 6-zawory

Na ich podstawie opracowano uproszczone modele procesów przepływu w których uwzględniono dane charakteryzujące głównie konstrukcję. Stosowne modele dla poszczególnych odmian przedstawiono na rysunku 19. Do opisu tych modeli zastosowano symbole podane dla procesu dmuchowego (rys. 26).



Rys. 26. Modele procesu przepływu w formierkach podciśnieniowych odpowiadające schematom konstrukcyjnym: a i b) Künkel Wagner (rys. 25 a i d); c) DISA Forma (rys. 25c); d) model autorski (rys. 25e)

Model autorski w postaci matematycznej jest modelem otwartym co umożliwia dostosowanie go do konkretnego modelu formierki danego producenta.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Równocześnie możliwa jest symulacja działania – przebiegu procesu przepływu dla dowolnej konstrukcji działającej z zastosowaniem procesu podciśnieniowego.

W przypadku analizowanych rozwiązań (rys.25) istnieje realna szansa optymalizacji ich parametrów, a przez to zwiększenia wydajności formowania i jakości form. Przeprowadzenie symulacji procesu przepływu dla poszczególnych formierek podciśnieniowych umożliwi ich optymalizację, poprzez dobór odpowiednich wartości parametrów, wśród których należy wymienić między innymi:

- wielkość zbiorników podciśnieniowych,
- wielkość przekrojów instalacji podciśnieniowych
- ilość i rozmieszczenie odpowietrzeń w płycie modelowej
- czas trwania procesu formowania

Symulację należy przeprowadzić indywidualnie dla każdej formierki w związku z indywidualnymi rozwiązaniami jakie cechują poszczególnych producentów wymienionych maszyn formierskich.

Na podstawie analizy porównawczej modelu autorskiego i stosowanych rozwiązań praktycznych można stwierdzić, że Producenci przytoczonych rozwiązań osiągają dobre efekty, często nie ujawniając metodyki konstruowania i projektowania maszyn. Można przypuszczać, że istnieje pewne rozwiązanie analityczne, jako dopełnienie do metodyki prób i błędów. Pomimo, że jest to bardzo kosztowna i czasochłonna metodyka, to nadal ona dominuje w procesach innowacyjnych. Opracowany model jest wykładnikiem postępu i daje realne szanse na nowoczesne podejście do projektowania tego typu maszyn i procesów zagęszczania. Celem zasadniczym, który może być osiągnięty poprzez analityczne opracowanie procesu to dążenie do optymalnego przekształcania energii „powietrza” – podciśnienia na efekt zagęszczania.

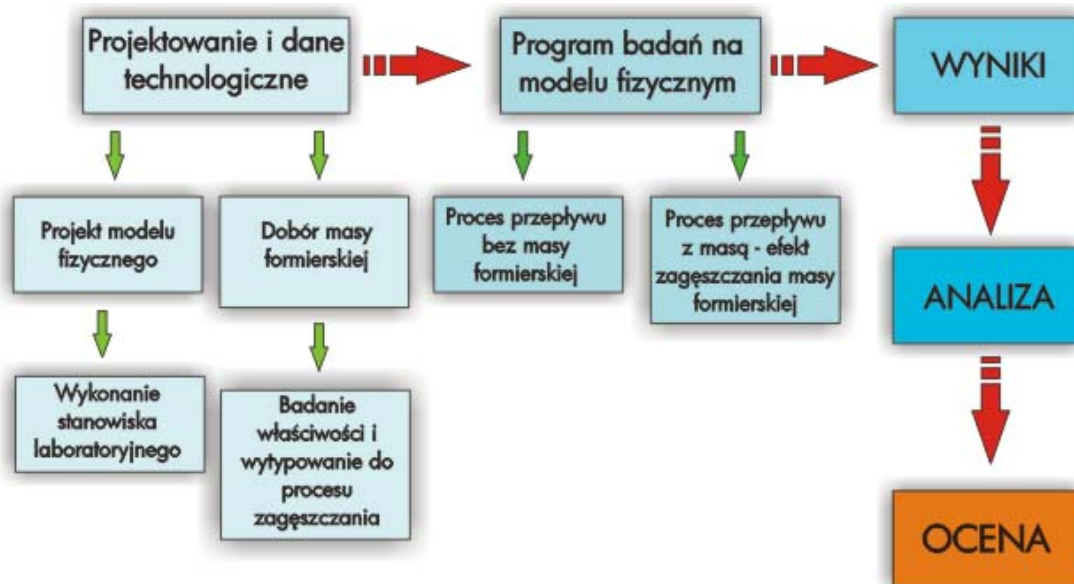
5. Badania symulacyjne i eksperymentalne stanowiska laboratoryjnego do formowania podciśnieniowego

Program działań badawczych ma na celu sprawdzenie poprawności syntezy modelu analityczno-matematycznego i jego weryfikację poprzez badania na modelu fizycznym odwzorowującym instalację podciśnieniową i zachodzące w niej zjawiska dotyczące procesu przepływu.

Badania zrealizowano w trzech etapach:

- 1) badania symulacyjne instalacji podciśnieniowej, będącej odpowiednikiem modelu matematycznego
- 2) badania eksperymentalne na modelu fizycznym w warunkach stanowiska laboratoryjnego
- 3) analiza i ocena wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych instalacji podciśnieniowej.

Schemat metodyki badań w formie graficznej przedstawia rysunek 27.



Rys. 27. Diagram metodyki badań procesu formowania podciśnieniowego

5.1 Badania symulacyjne stanowiska laboratoryjnego do formowania podciśnieniowego

Badania symulacyjne formierki podciśnieniowej zrealizowano dla modelu instalacji podciśnieniowej (rys. 23), który charakteryzują następujące parametry:

- a) w przypadku dużej formy:
- objętość zbiornika podciśnieniowego $14,17 \text{ dm}^3$
 - objętość dużej formy $6,15 \text{ dm}^3$
 - sumaryczna powierzchnia odpowietrzeń – $965,1 \text{ mm}^2$
 - współczynnik wypływu $\mu_1 = 0,9$
 - współczynnik wypływu $\mu_2 = 0,6$
 - powierzchnia przelotowa odpowietrzeń $A_1 = 507 \text{ mm}^2$
 - powierzchnia przelotowa zaworu $A_2 = 231 \text{ mm}^2$
 - czas otwarcia zaworu = $0,13 \text{ s}$
 - średnia prędkość otwarcia zaworu = $0,5 \text{ m/s}$
- b) w przypadku małej formy
- objętość zbiornika podciśnieniowego $14,17 \text{ dm}^3$
 - objętość małej formy $1,15 \text{ dm}^3$
 - sumaryczna powierzchnia odpowietrzeń – 193 mm^2
 - współczynnik wypływu $\mu_1 = 0,9$
 - współczynnik wypływu $\mu_2 = 0,65$
 - powierzchnia przelotowa odpowietrzeń $A_1 = 507 \text{ mm}^2$
 - powierzchnia przelotowa zaworu $A_2 = 231 \text{ mm}^2$
 - czas otwarcia zaworu = $0,13 \text{ s}$
 - średnia prędkość otwarcia zaworu = $0,5 \text{ m/s}$

Badania symulacyjne modelu matematycznego procesu formowania podciśnieniowego przeprowadzono w środowisku programu Matlab (wersja 7,5) i Simulink (wersja 7,0), przyjmując następujące warunki początkowe:

- temperatura powietrza $T = 298 \text{ K}$,

- stała gazowa powietrza $R=287 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$,
- wykładnik adiabaty $\kappa=1,4$,

5.2 Badania eksperymentalne stanowiska laboratoryjnego do formowania podciśnieniowego

Program badań eksperymentalnych zrealizowano na modelu fizycznym formierki podciśnieniowej wykonanym w wersji stanowiska laboratoryjnego. Ideowy schemat modelu przedstawiono na rysunku 23a natomiast strukturę przestrzenną stanowiska na rysunku 23b.

Stanowisko laboratoryjne składa się z następujących układów:

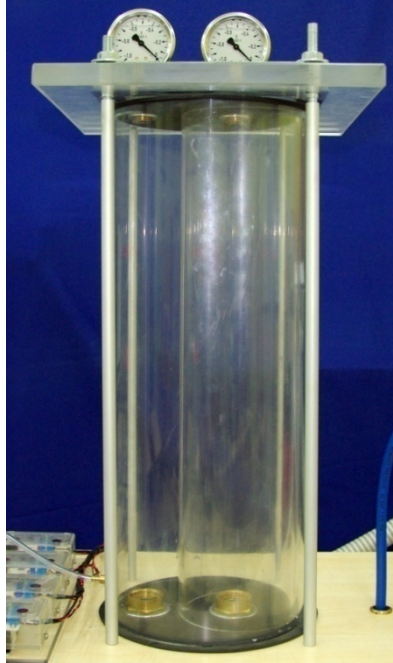
- a) układ instalacji podciśnieniowej jako model fizyczny formierki
- b) układ pomiarowy
- c) układ rejestracji wyników pomiarów

Układ instalacji podciśnieniowej

Tworzy model fizyczny maszyny formierskiej w skład którego wchodzi

- źródło podciśnienia; dwie pompy próżniowe o mocy 0,18 kW każda, połączone zaworami elektromagnetycznymi z instalacją formierki.
- komora wewnętrzna; utworzona z dwóch cylindrów o średnicy 110 i 190 mm i pojemności $V_1= 4,75 \text{ dm}^3$, $V_2= 9,42 \text{ dm}^3$. Aby uzyskać trzecią pojemność (pseudo trzecią komorę) cylinder o mniejszej średnicy zamontowano wewnątrz cylindra o średnicy większej (rys. 21). Odpowiednie połączenie instalacją rurową wraz zaworami kulowymi WKK4a stworzyło strukturę przestrzenną trzech komór o objętości $V_1= 4,75 \text{ dm}^3$, $V_2= 9,42 \text{ dm}^3$, $V_3=14,17 \text{ dm}^3$. Taka konfiguracja zwiększa możliwość eksperymentu w zadaniu ustalenia wpływu objętości komory na efekt zagęszczenia bez potrzeby rozbudowania struktury przestrzennej stanowiska (rys. 28).

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

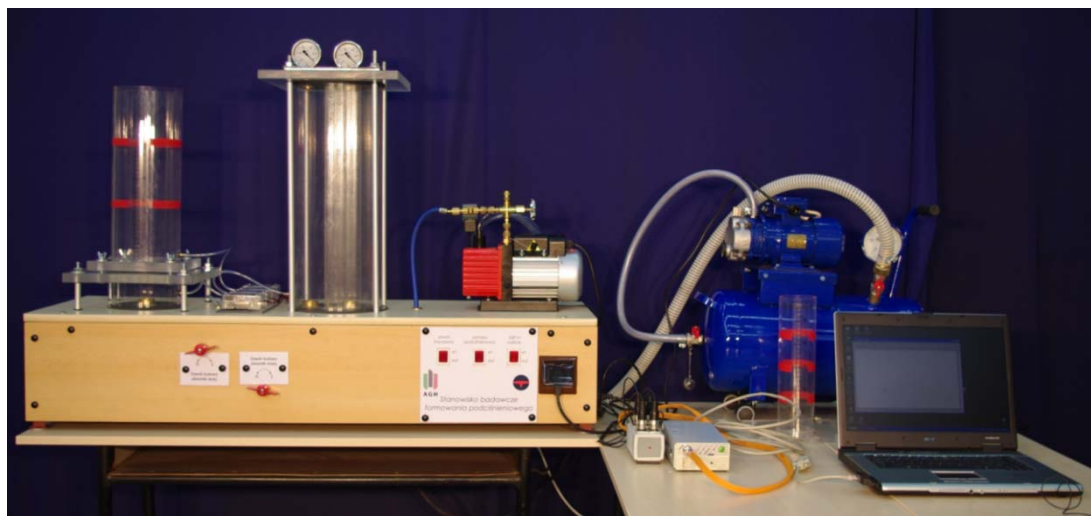


Rys. 28. Sposób montażu cylindrów komory podciśnieniowej.

- instalacja rurowa; składała się z rur stalowych oraz złączek wykonanych z miedzi. Wszystkie przekroje miały średnice minimum 1". W miejscach szczególnie narażonych na nieszczelność (m. in. koniec instalacji w zbiornikach podciśnieniowych) zastosowano połączenie typu nakrętka + złączka wykonane z miedzi. Większa dokładność wykonania tych elementów umożliwiała precyzyjne dokręcenie i uszczelnienie układu.
- zawór impulsowy podciśnieniowy; jeden z najważniejszych elementów układu, zawór podciśnieniowy membranowy, kątowy 2/2 NC model ADK11 25G (załącznik nr3). Umożliwiał on połączenie instalacji podciśnieniowej z komorą technologiczną. Zawór był wyzwalany elektrycznie, wyłącznikiem - umożliwiało to jego natychmiastowe otwarcie. Dobór odpowiedniego zaworu jest bardzo ważnym elementem planowania instalacji, ponieważ czas jego otwarcia jest bardzo istotny z punktu widzenia pracy instalacji i uzyskiwanych efektów formowania. Wykonane symulacje procesu przepływu przy zmiennym czasie otwarcia (w granicach od 0,8 do 1,2 t_z) nie wykazały istotnego wpływu

tego parametru na szybkość zmniejszania ciśnienia w systemie: forma- komora podmodelowa.

- płyta modelowa; została wykonana z PMMA, umożliwiła zainstalowanie komór technologicznych o różnej wielkości. W płycie zainstalowano kanały odpowietrzające wyposażone w mosiężne korki odpowietrzające. Ich ułożenie oraz wpływ na proces zagęszczania przedstawiono w rozdziale 6.5.
- komory technologiczne; stanowisko było wyposażone w dwie komory technologiczne – formy. Zostały wykonane z PMMA, umożliwiło to rejestrację przebiegu procesu formownia za pomocą kamery cyfrowej. Komora większa miała średnicę 140 mm i wysokość 400 mm, natomiast komora mniejsza o średnicy 70 mm i wysokości 300 mm. Wzdłuż wysokości komór zaznaczono na czerwono wartości smukłości form.



Rys. 29. Widok modelowego stanowiska badawczego formowania podciśnieniowego

Układ pomiarowy

Układ pomiarowy, który zainstalowano na stanowisku badawczym składał się z czterech przetworników różnicowych, podciśnieniowych MPX2100 firmy Motorola. Dodatkowo sygnał analogowy był wzmacniany poprzez wzmacniacze sygnału MC33272A. Specyfikacje poszczególnych elementów przedstawione zostały w załącznikach (przetwornik – załącznik nr 1, wzmacniacz – załącznik nr 2). Widok zestawu pomiarowego pokazano na rysunku 29 i 30. Przetworniki zostały

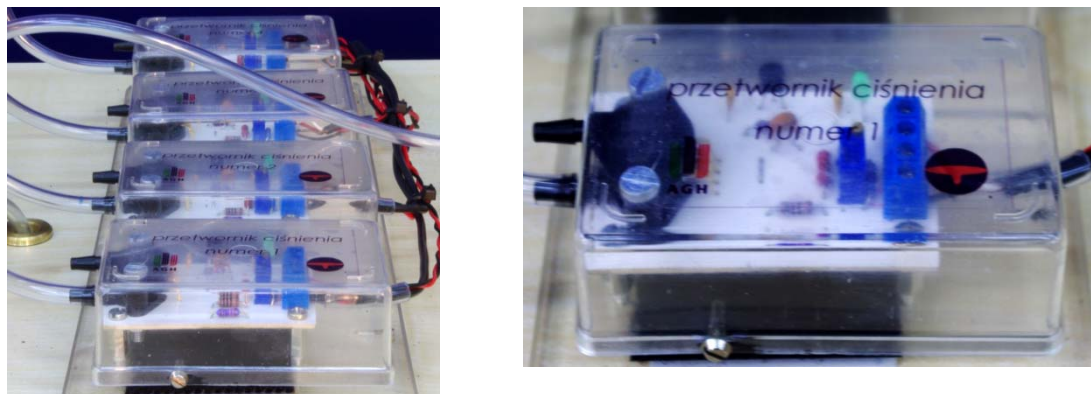
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

podłączone za pomocą elastycznego przewodu rurowego do 4 miejsc instalacji podciśnieniowej. Były zlokalizowane w następujących punktach:

- 1- instalacja podciśnieniowa pod zaworem impulsowym
- 2- komora pod płytą modelową
- 3- zbiornik podciśnieniowy
- 4- komora technologiczna

Takie podłączenie umożliwiała rejestracje ciśnienia w punktach instalacji stanowiska badawczego.

Ponieważ są to przetworniki różnicowe [60], ciśnieniem odniesienia było ciśnienie atmosferyczne. Badania przeprowadzano na przestrzeni kilku tygodni, z tych względów konieczne było zbadanie wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na uzyskiwane wyniki. Po analizie danych stwierdzono, że wpływ ten jest znikomy, sięgający 1-2 jednostek pomiarowych odczytanych z przetworników, przy około 100 jednostkach przypadających na 0,1 MPa. Błąd ten jest mniejszy od błędu pomiarowego i nie był brany pod uwagę podczas kolejnych badań.

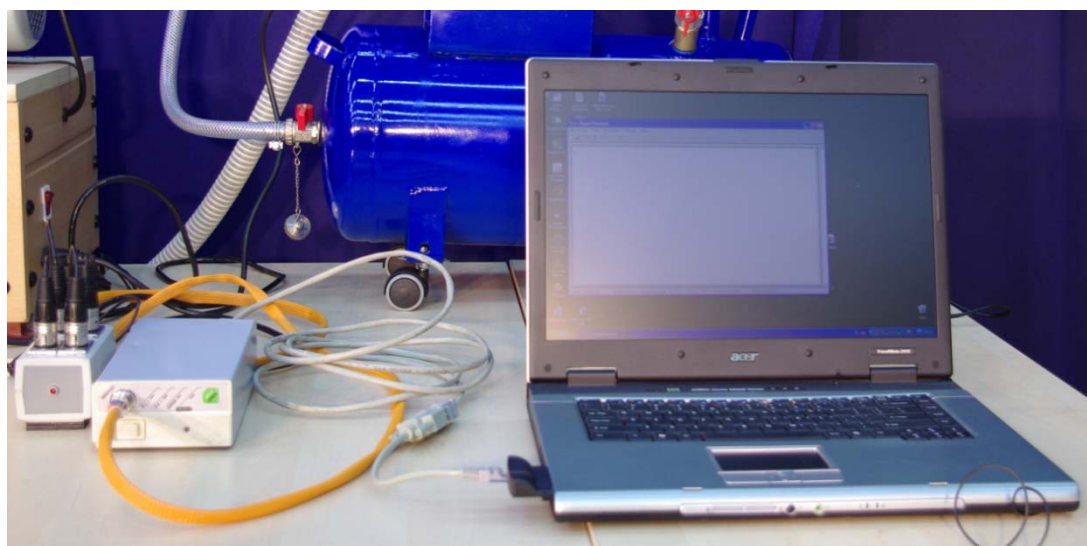


Rys. 30. Widok układu pomiarowego oraz pojedynczego przetwornika ciśnienia

Układ rejestrujący

Składał się z rejestratora cyfrowego na bazie mikroprocesora. Szczegółowy opis układu zawierają publikacje [46,47]. Układ ten zapewniał dokładną rejestrację danych analogowych napływających z układu pomiarowego. Dane te były próbkowane z częstotliwością 300 Hz dla każdego układu przetwornika. Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników udowodniła, iż częstotliwość ta jest

zupełnie wystarczająca dla procesu jaki był rejestrowany. Rejestrator wyposażony był w szereg rozszerzeń i gniazd umożliwiających między innymi zdalne rozpoczęcie procesu rejestracji, przesyłanie danych w czasie rzeczywistym do komputera poprzez złącze RS232 oraz USB, z różnymi prędkościami przesyłania informacji. Połączenie rejestratora z komputerem za pomocą kabla RS232 – umożliwiała korzystanie z ogólnie dostępnego oprogramowania. Układ rejestrujący przedstawiono na rysunku 31.

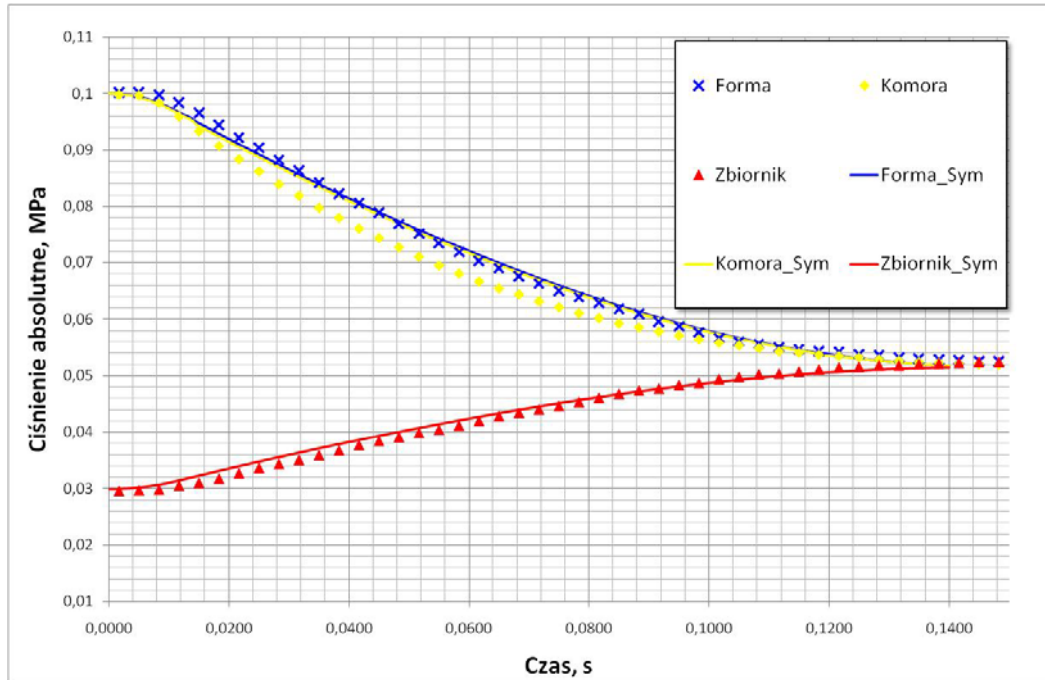


Rys. 31. Widok układu rejestrującego

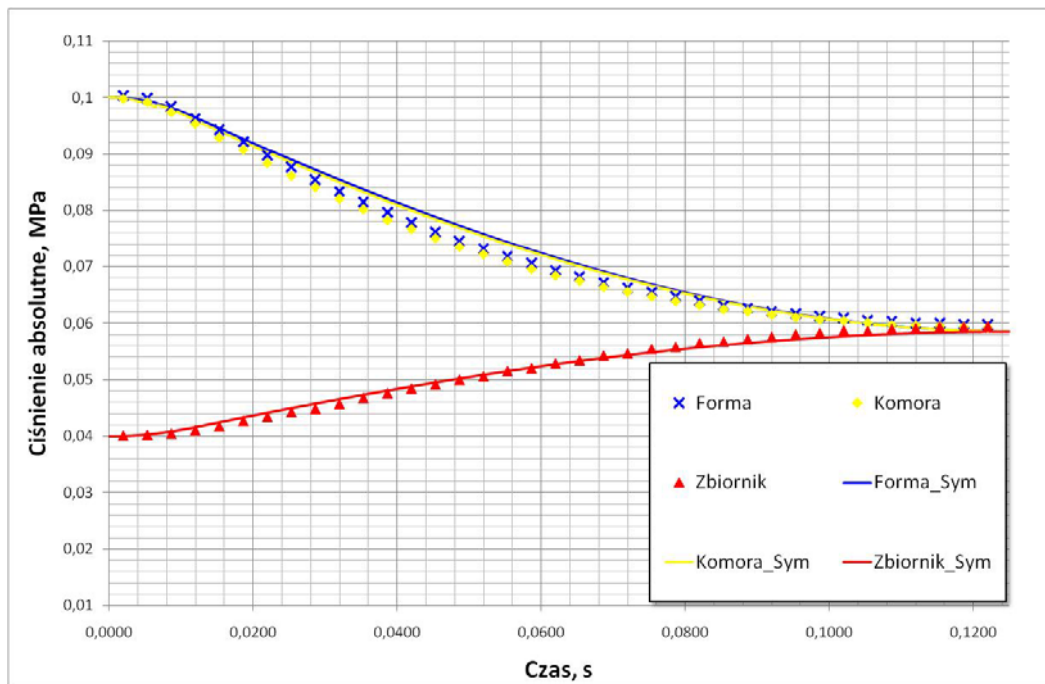
Badania przeprowadzono dla pustej, bez masy, szczelnej przestrzeni technologicznej [61]. Jak już wspomniano w rozdziale 4, ten etap badań miał na celu ocenę możliwości formierki pod względem intensywności procesów przepływu oraz przykładowo ocenę wpływu parametrów konstrukcyjnych na ich przebieg.

Badania eksperymentalne stanowiska formowania podciśnieniowego przeprowadzono dla czterech różnych wartości podciśnienia oraz dla dwóch różnych objętości komór technologicznych (form). Objętość zbiornika podciśnieniowego była stała i wynosiła $14,17 \text{ dm}^3$. Badania te umożliwiły wyznaczenie dynamiki zmian ciśnienia w czasie, wpływu wielkości podciśnienia oraz wielkości komory technologicznej, z czym wiąże się również wielkość odpowietrzeń płyty modelowej. Uzyskane wyniki badań przedstawiono na rysunkach 32 do 39.

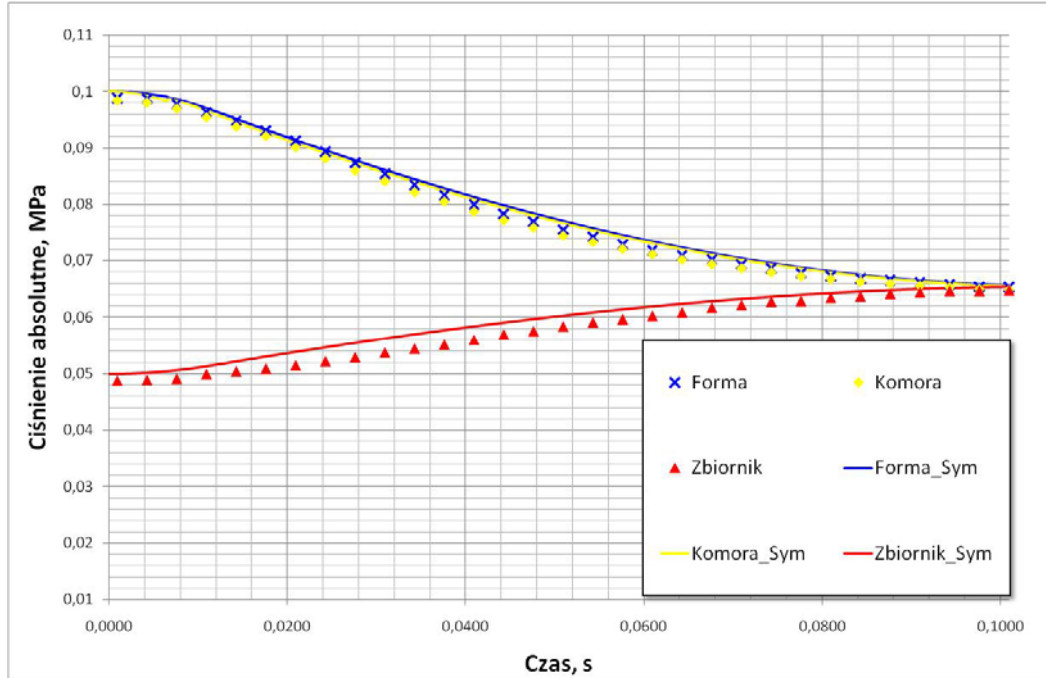
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



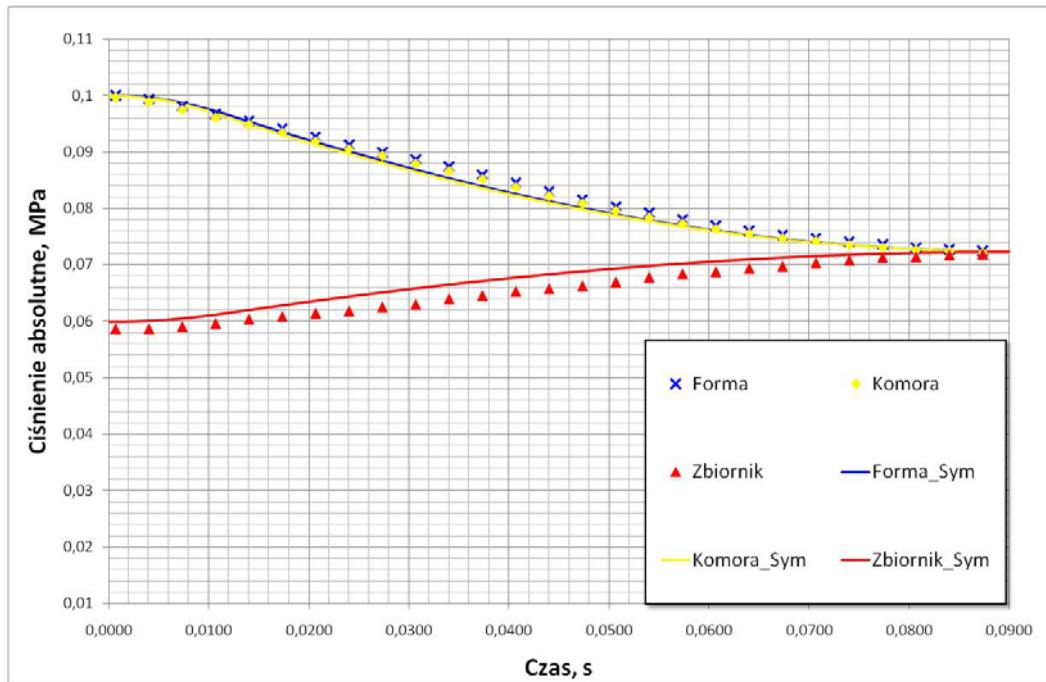
Rys. 32. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,03 MPa, dla dużej formy



Rys. 33. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,04 MPa, dla dużej formy.

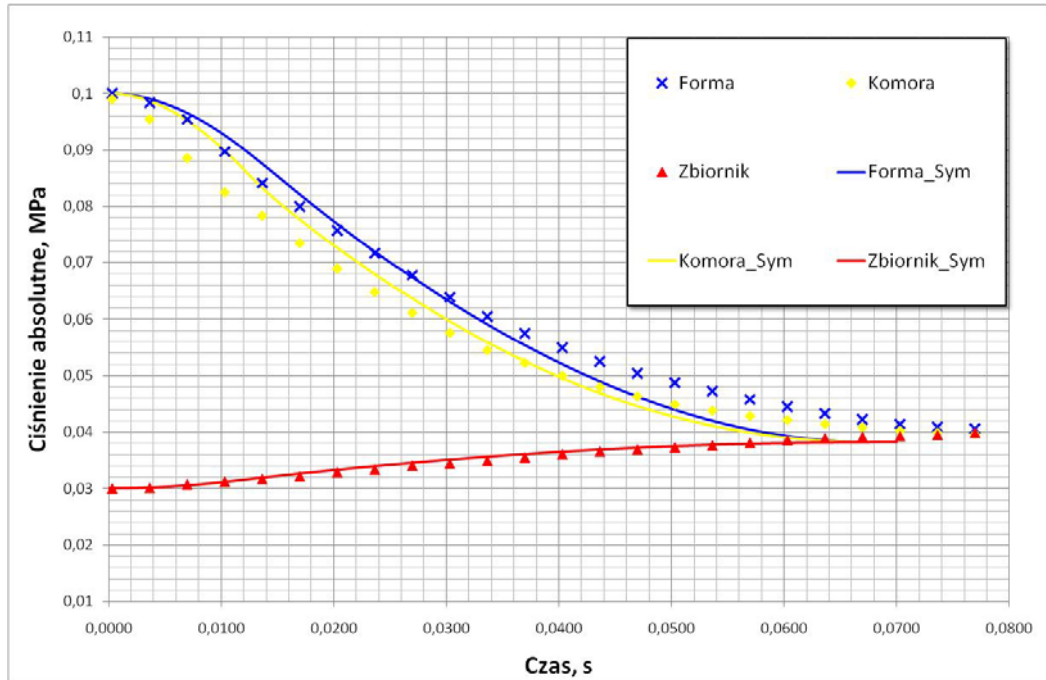


Rys. 34. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,05 MPa, dla dużej formy

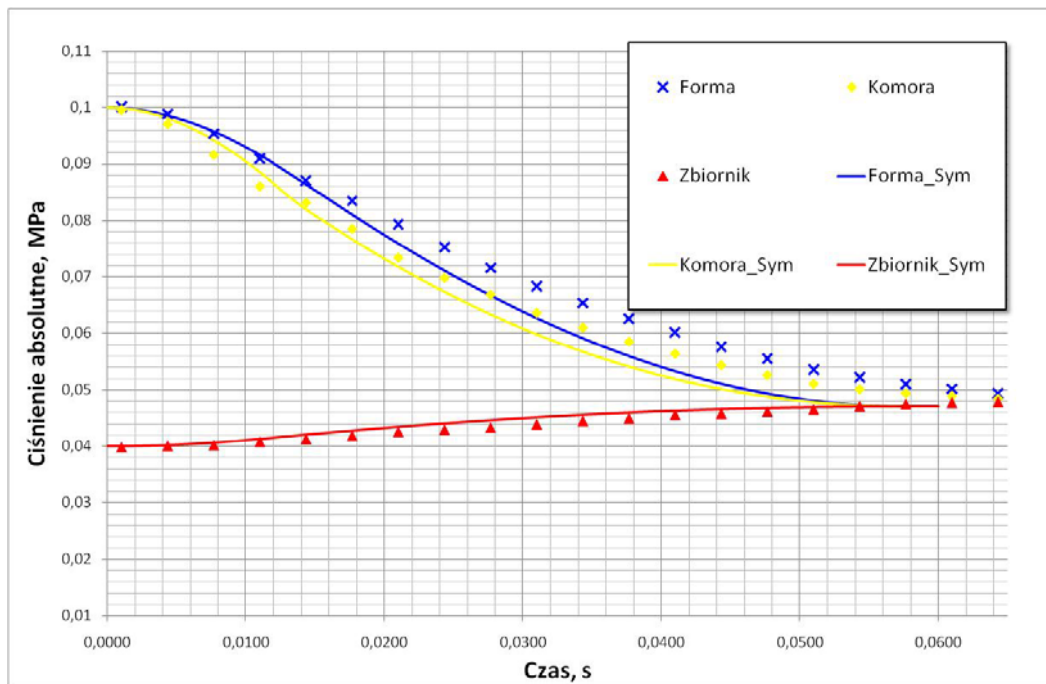


Rys. 35. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,06 MPa, dla dużej formy

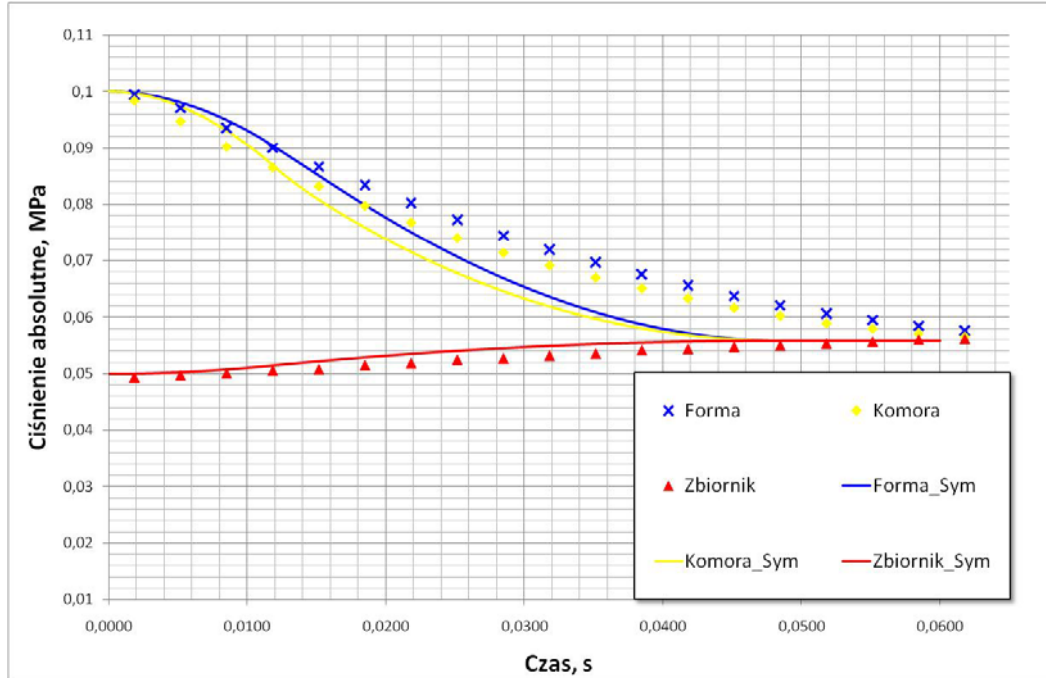
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



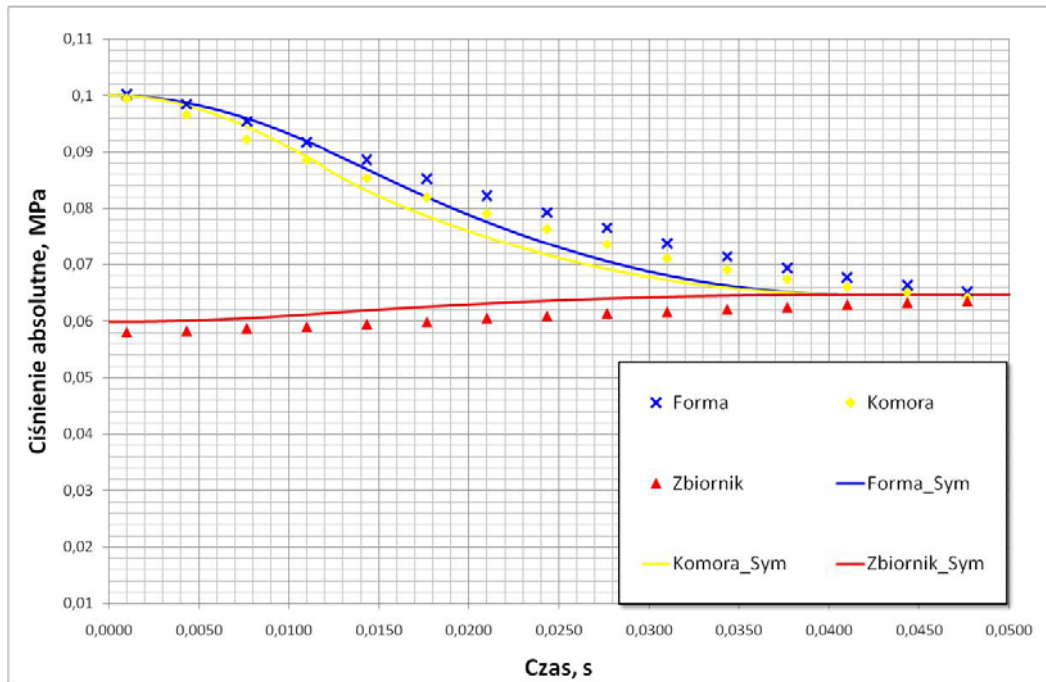
Rys. 36. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,03 MPa, dla małej formy



Rys. 37. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,04 MPa, dla małej formy



Rys. 38. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,05 MPa, dla małej formy



Rys. 39. Zmiana ciśnienia w poszczególnych miejscach instalacji formierki podciśnieniowej wyznaczone podczas symulacji oraz badań eksperymentalnych przy wartości podciśnienia 0,06 MPa, dla małej formy

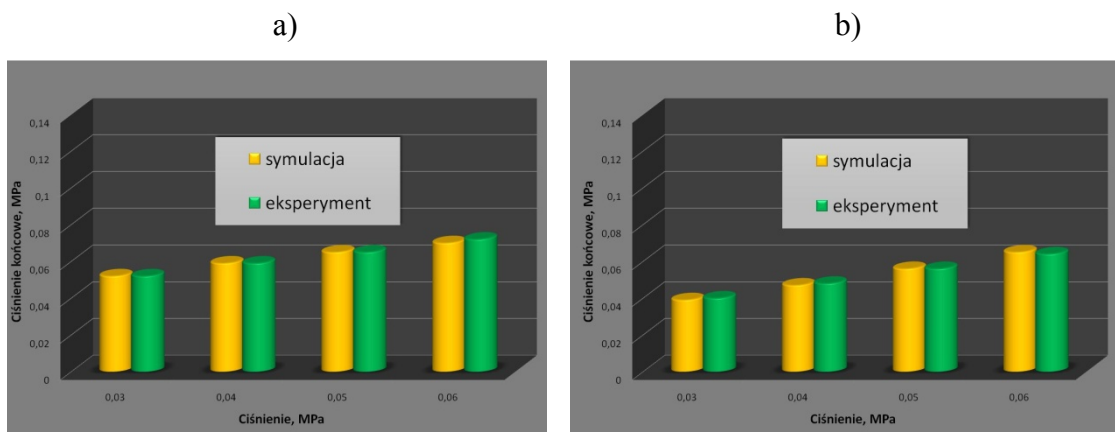
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Na podstawie uzyskanych wyników z badań na stanowisku modelowym formierki podciśnieniowej można stwierdzić, że charakter zmierzonych parametrów, zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym, jest bardzo zbliżony do wyników uzyskanych z przeprowadzenia symulacji w programie Matlab Simulink na podstawie modelu matematycznego procesu przepływu powietrza w instalacji podciśnieniowej opracowanego przez Autora.

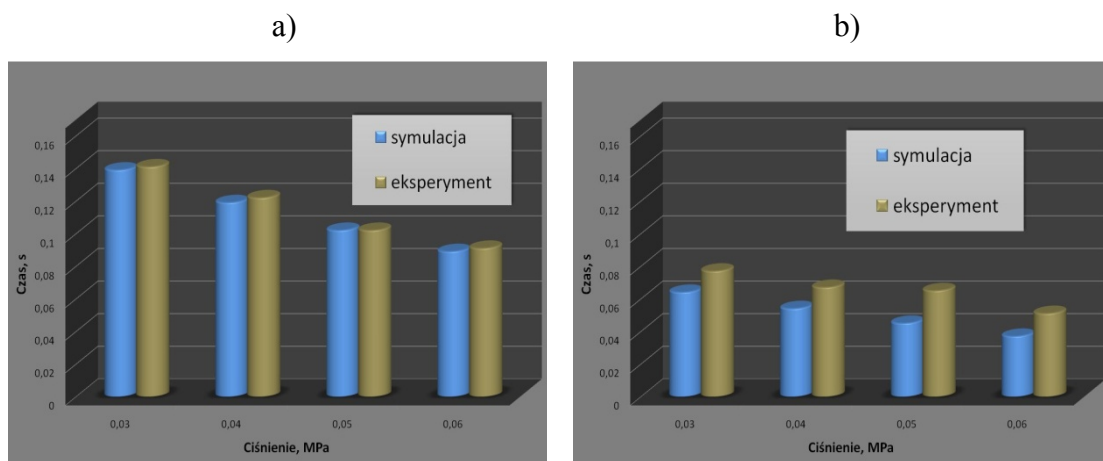
5.3 Analiza wyników z badań na stanowisku laboratoryjnym do formowania podciśnieniowego

Analizę oraz weryfikację opracowanego modelu matematycznego dokonano poprzez porównanie wyników zmian ciśnienia, uzyskanych z badań symulacyjnych i eksperymentu przeprowadzonego na stanowisku modelowym. Na podstawie analizy wykresów przedstawionych na rysunkach 32 do 39 można stwierdzić że model matematyczny z bardzo dobrym przybliżeniem opisuje przebieg zmian ciśnienia w wybranych elementach instalacji podciśnieniowej.

Na rysunkach 40 oraz 41 przedstawiono w sposób graficzny zestawienie danych dotyczących czasu trwania procesu oraz ciśnienia końcowego, otrzymanych z symulacji oraz badań eksperymentalnych, dla dużej i małej formy.



Rys. 40. Ciśnienie końcowe procesu podciśnieniowego podczas symulacji i badań eksperymentalnych. a- duża forma, b- mała forma



Rys. 41. Czas zakończenia procesu podciśnieniowego podczas symulacji i badań eksperymentalnych. a- duża forma, b- mała forma

Efektom przeprowadzonych badań jest również informacja o skutecznym działaniu zaworu impulsowego, specjalnie przystosowanym do procesów podciśnieniowych. Maksymalny spadek ciśnienia to około 0,5 MPa/s.

Przedstawione na rysunku 41a wyniki wykazują większą zgodność pomiarów z wynikami symulacji, ponieważ dotyczą eksperymentów prowadzonych przy mniejszej dynamice przebiegu procesu. Przy zwiększaniu dynamiki procesu przepływu większą rolę zaczynają odgrywać parametry, których precyzyjne określenie wymagałoby dodatkowych doświadczeń (np. określenia współczynników wpływu jako zależności funkcyjnych).

Zaprezentowane w tym rozdziale wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych modelowego stanowiska do formowania podciśnieniowego wykazały, że przyjęty model matematyczny dobrze opisuje przebieg procesu przepływu powietrza w instalacji formierki.

Opracowany model matematyczny może stanowić podstawę do optymalizacji zarówno procesu podciśnieniowego jak również do optymalizacji już istniejących maszyn i linii formierskich wykorzystujących podciśnienie jako jeden z etapów zagęszczania masy formierskiej. Optymalizacja ta będzie polegała na prawidłowym doborze parametrów procesu.

6. Metodyka badań modelu fizycznego w warunkach laboratoryjnych

Proces podciśnieniowego zagęszczania mas jest procesem złożonym (co wykazano w początkowych rozdziałach) pod względem cech kinematyczno-dynamicznych oraz konstrukcyjnym elementów tworzących instalację podciśnieniową [59]. Jednoznaczne określenie jednego kryterium do oceny procesu jest praktycznie niemożliwe, tym bardziej, że zbiór parametrów ma charakter zmiennych decyzyjnych, kontekstowych i zależnych. Zmienne decyzyjne to zmienne, które w procesie badawczym mogą być zmieniane, aby stworzyć szereg możliwych warunków rozwiązania instalacji i scharakteryzowania procesu. Zmienne kontekstowe lub niezależne dotyczyły pewnych ustaleń, które nie były zmieniane podczas badań. Natomiast zmienne zależne to cele, które mogą być uzależnione od rozwiązania; w tym przypadku dotyczy to modelu fizycznego w wersji stanowiska laboratoryjnego i wielkości mierzonych.

W rozdziałach 4 i 5 przedstawiono analizę i syntezę postępowania analityczno-matematycznego oraz symulację rozwiązania wraz z porównaniem z praktycznymi rozwiązaniami w przemyśle.

Dopełnieniem procedury rozwiązania przyjętej tezy pracy jest sprawdzenie zależności określonych modelowo za pomocą danych eksperymentalnych.

Poznanie mechanizmu procesu zagęszczania i określenie jego parametrów przeprowadzono metodą pomiaru wielkości fizycznych i technologicznych oraz określenia związków funkcyjnych pomiędzy danymi z pomiarów, zgodnie z ogólną metodyką badania maszyn i urządzeń odlewniczych [9]. Związki funkcyjne dotyczą wpływu na przebieg procesu formowania następujących parametrów zdefiniowanych jako:

- a) wartość podciśnienia powietrza w instalacji – formierce
- b) objętość zbiornika podciśnieniowego jako źródła energii procesu przepływu
- c) objętość komory technologicznej w której następuje zagęszczanie masy

- d) ilość masy formierskiej odpowiadająca początkowemu wypełnieniu komory technologicznej
- e) konstrukcja geometryczna modeli, głównie smukłość
- f) ilość otworów odpowietrzających w płycie modelowej wypełnionych specjalnymi korkami, określone sumaryczną powierzchnią kanałów odpowietrzających

Materiałem na którym badano efekt zagęszczenia (stopień zagęszczenia) była syntetyczna masa formierska z bentonitem.

Charakterystyka masy formierskiej

Masa z bentonitem jest powszechnie stosowana na formy i najbardziej reprezentatywną masę do zagęszczania w procesie podciśnieniowym.

W programie badań użyto masy o następującym składzie [23, 24]:

- piasek kwarcowy Jaworzno-Szczakowa 100 części wagowych (średnia wielkość ziarna $d_L = 0,24$ mm, frakcja główna $F_g = 83,75\%$ (0,32/0,20/0,16))
- bentonit Zębiec Specjal, 8 cz. wag.,
- pył węglowy 4 cz. wag.,
- wilgotność 2,4%

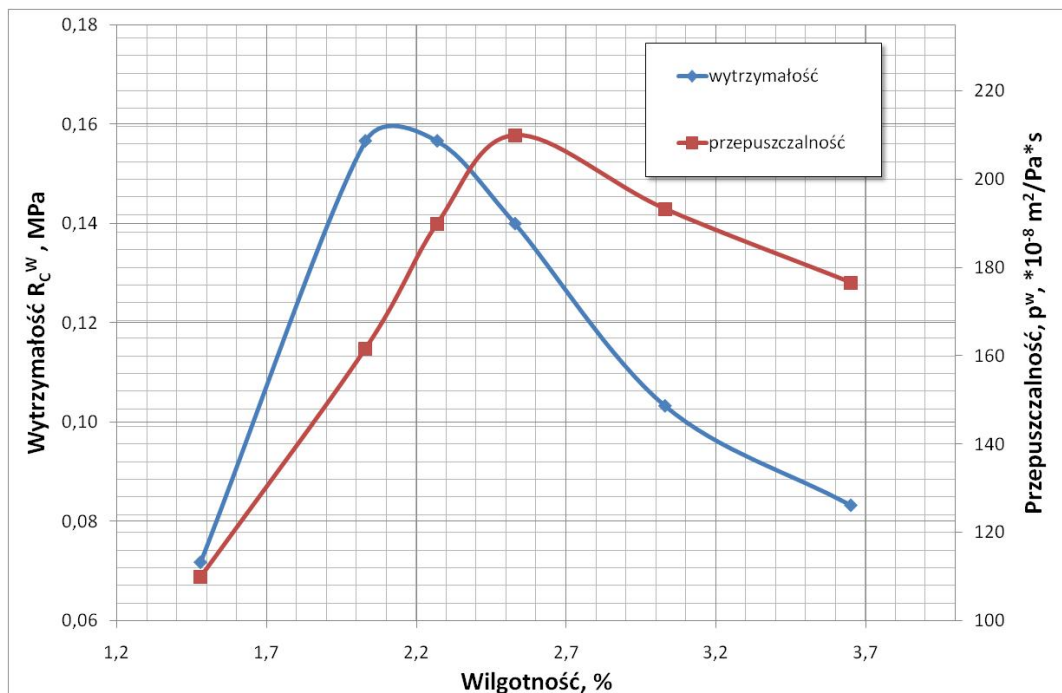
Jednym z głównych parametrów wpływających na właściwości masy jest wilgotność określana procentową zawartością wody. Od wilgotności zależą następujące wielkości:

- przepuszczalność, p^w [$m^2/Pa*s$]
- wytrzymałość na ściskanie, R_c^w [MPa]
- wytrzymałość na rozciąganie, R_m^w [MPa]
- zagęszczalność, Z [%]
- twardość, T_c
- płynność Dieterta, [%]
- płynność swobodna, [g]

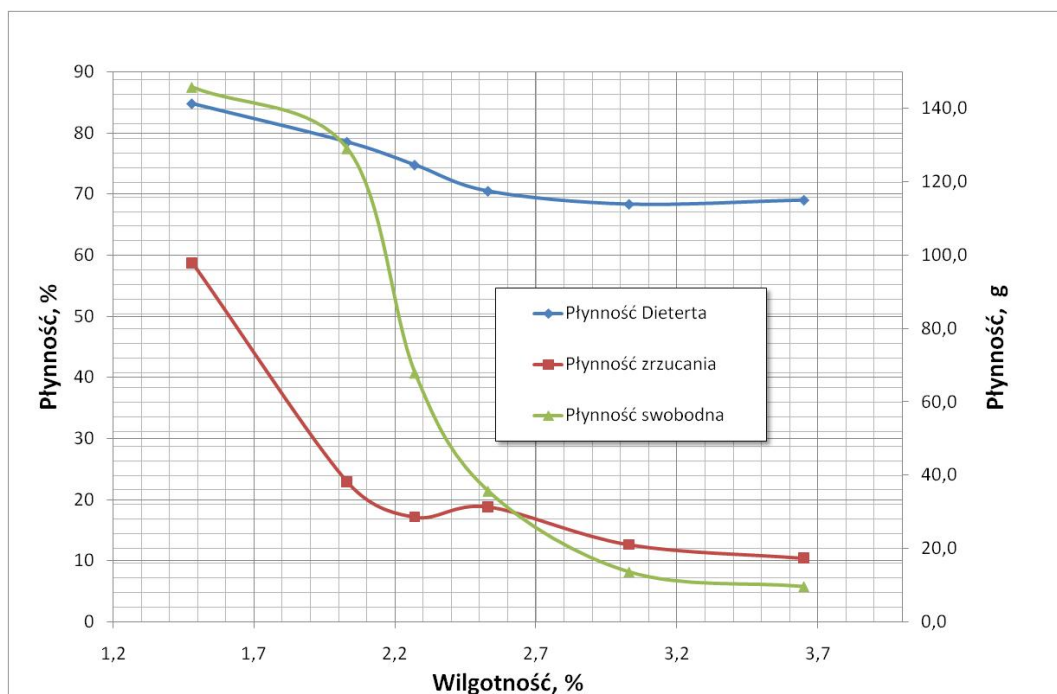
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

- płynność zrzucania, [%]
- osypliwość, [%]

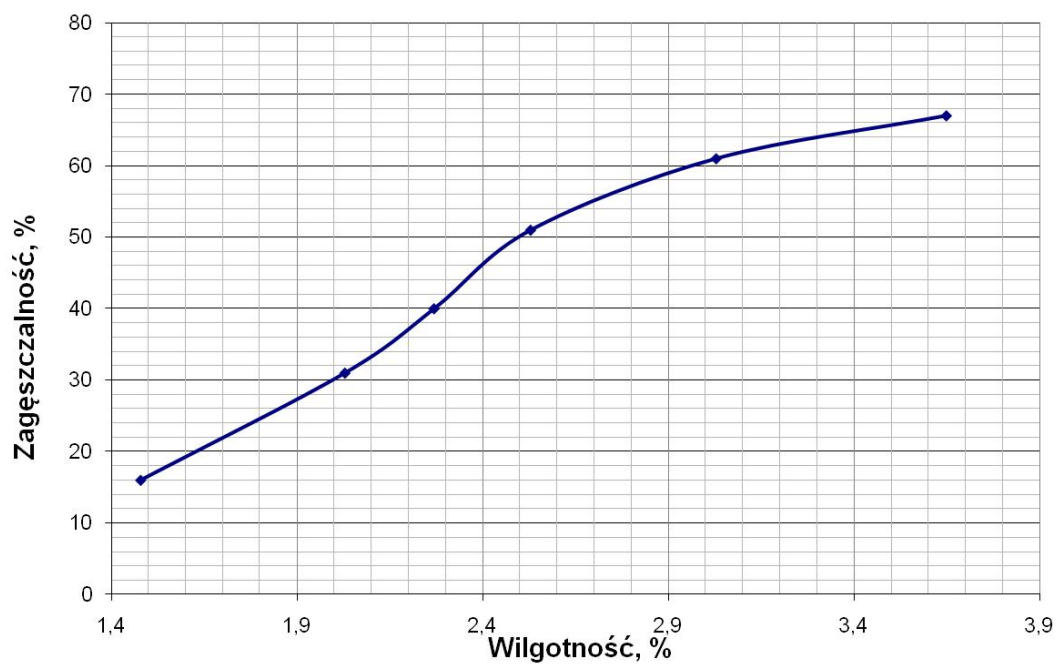
Z kolei o jakości masy (dobroci) dającej możliwości dobrego jej zagęszczenia w formie decyduje poziom wymienionych parametrów w funkcji wilgotności. W przypadku badanej masy z przeznaczeniem do procesu zagęszczania podciśnieniowego, optymalne wartości parametrów uzyskano przy wilgotności około 2,4%. Wyniki badań masy, podane w formie graficznej – wykresy zależności (rys. 42÷44) potwierdzają przyjęty zakres wilgotności, który będzie dotrzymany we wszystkich kolejnych badaniach. Dodatkowo w tabelicy 1, podano dane, które nie przełożono na zależności graficzne



Rys. 42. Wpływ wilgotności na wytrzymałość na ściskanie R_c^w oraz przepuszczalność p^w .



Rys. 43. Wpływ wilgotności na płynność Dieterta, zrzucania oraz swobodną



Rys. 44. Wpływ wilgotności na zagęszczalność masy formierskiej

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Tabela 1. Wpływ wilgotności na pozostałe parametry

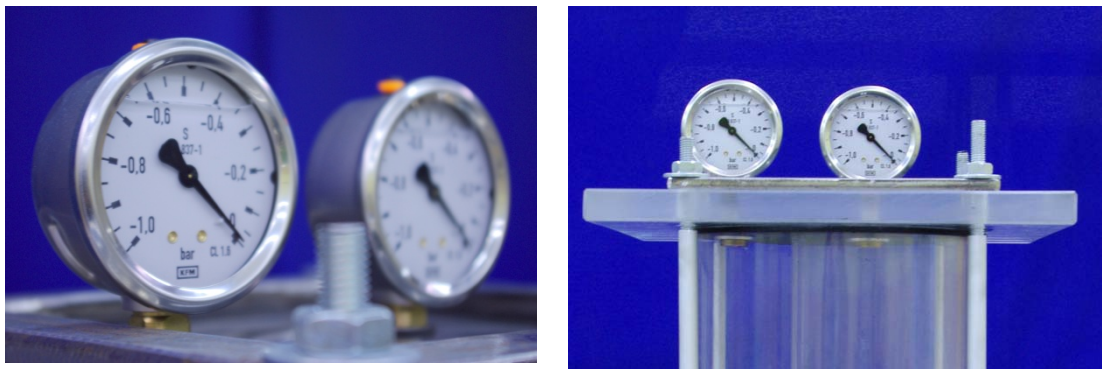
| Wilgotność W [%] | Gęstość pozorna, ρ_0 g/cm ³ | Wytrzymałość R_m^w [MPa] *10 ⁻³ | Zagęszczalność Z [%] | Twardość T_c | Osypliwość [%] |
|------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|----------------|----------------|
| 1,48 | 1,68 | 6,3 | 16 | 85 | |
| 2,03 | 1,63 | 12,3 | 31 | 89 | 47,10 |
| 2,27 | 1,58 | 18,4 | 40 | 89 | 36,49 |
| 2,53 | 1,58 | 10,7 | 51 | 89 | 27,59 |
| 3,03 | 1,63 | 9,7 | 61 | 87 | 1,72 |
| 3,65 | 1,65 | 7,7 | 67 | 86 | 0,85 |

6.1 Wpływ podciśnienia na efekty zagęszczenia masy formierskiej

Źródłem energii zagęszczenia w badanej metodzie formowania jest podciśnienie. Jego wartość wyrażana w MPa, ma decydujący wpływ na efekt wstępnego zagęszczenia masy formierskiej. Procedura badawcza przeprowadzona była według programu, który zakładał stałe (const.) wartości takich wielkości jak:

- objętość zbiornika podciśnieniowego,
- rozmieszczenie miejsc (punktów) o ściśle określonej powierzchni kanałów odpowietrzających,
- objętość komory technologicznej wypełnionej określoną ilością masy formierskiej.

Natomiast zmienną wielkością była wartość podciśnienia. Pomiar podciśnienia przeprowadzano metodą bezpośrednią z zastosowaniem wakuometrów glicerynowych o zakresie pomiaru od -1,0 do 0,0 bar (0 \pm 0,1 MPa). Widok ułożenia wakuometrów na stanowisku laboratoryjnym podano na rysunku 45.

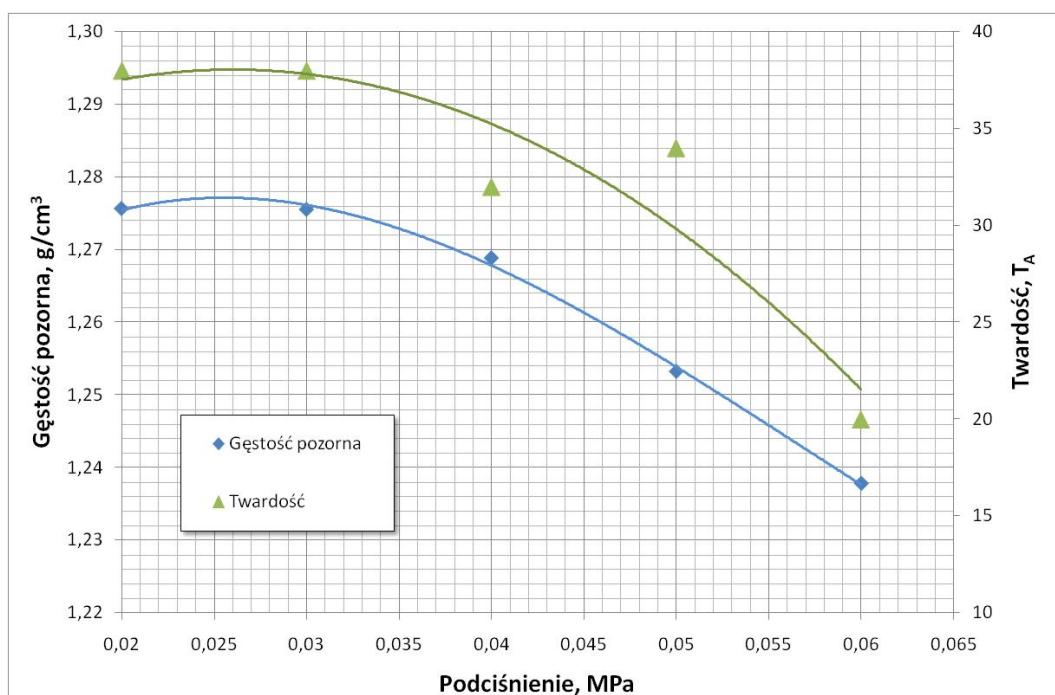


Rys. 45. Wakuometry glicerynowe użyte do badań.

Pomiar wpływu podciśnienia na efekt zagęszczenia przeprowadzono z masą formierską o wilgotności 2,4%.

Wielkościami mierzonymi były: gęstość pozorna zagęszczonej masy oraz twardość mierzona twardościomierzem typu T_A na płaszczyźnie formy (masy zagęszczonej) od strony płyty modelowej.

Wyniki pomiarów zostały przedstawione graficznie (rys. 46) w postaci wykresów zależności gęstości pozornej i twardości od wartości podciśnienia.



Rys. 46. Wpływ podciśnienia na efekty zagęszczenia masy formierskiej.

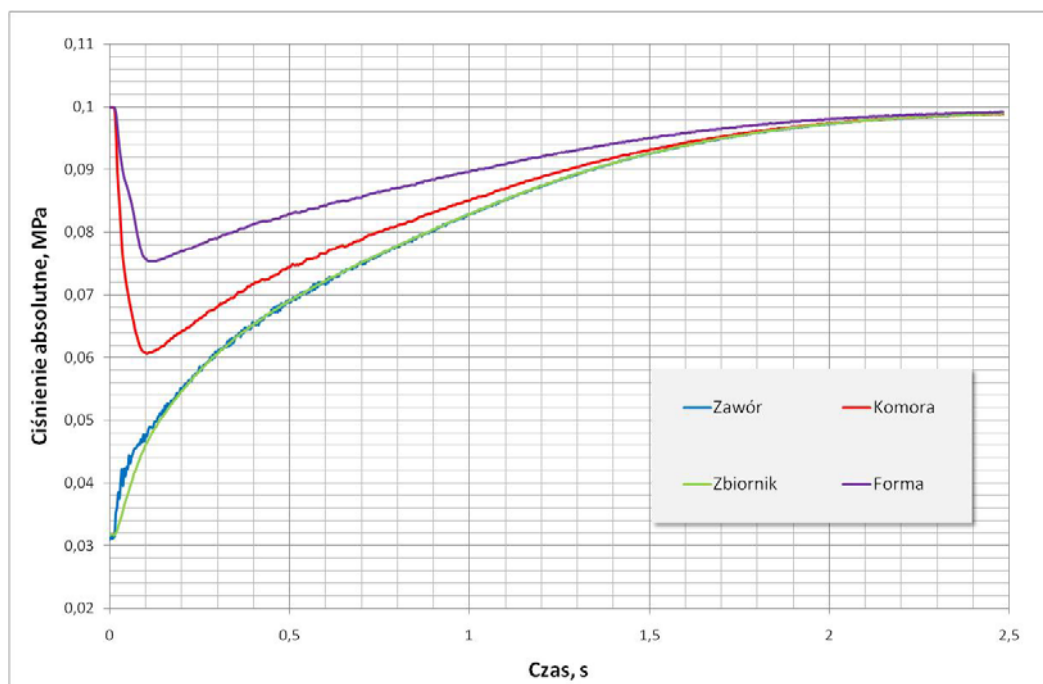
Bardzo ważnym parametrem decydującym o nakładach energetycznych związanych z procesem zagęszczania podciśnieniowego jest początkowa wartość ciśnienia w zbiorniku próżniowym.

Celem badań było określenie optymalnej wartości podciśnienia, która w określonych warunkach dotyczących konstrukcji instalacji oraz charakterystyki technologicznej masy, daje najlepszy efekt zagęszczenia.

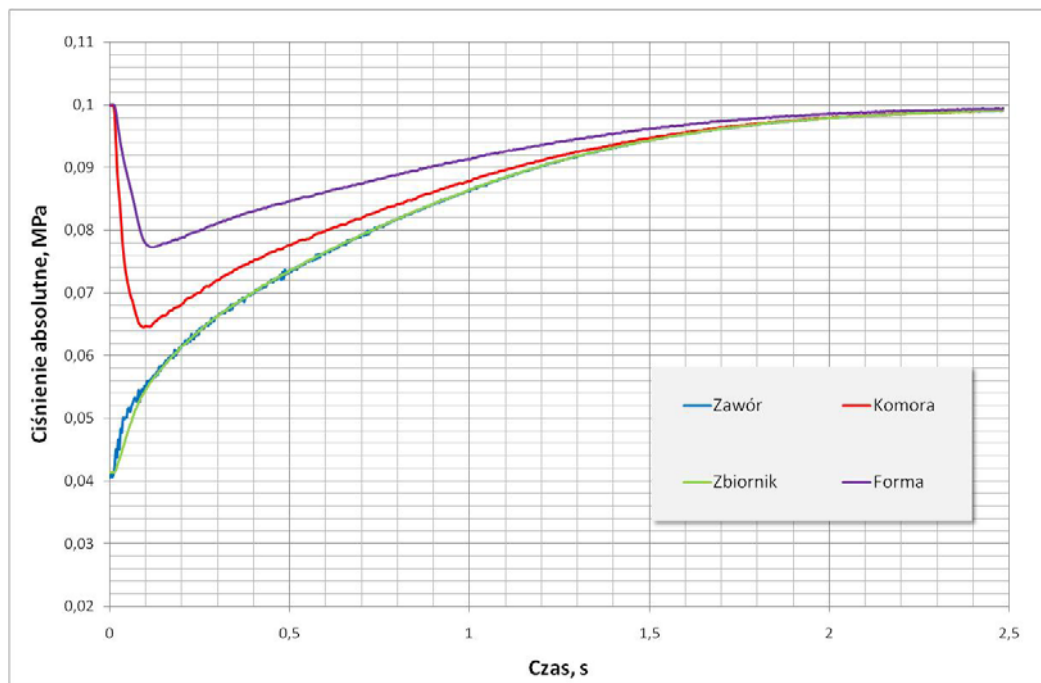
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

Z otrzymanych wyników, można stwierdzić, że wartość podciśnienia odpowiadająca dobrym efektom zagęszczenia wynosi około 0,03 MPa. Charakter zmian widocznych na wykresach wskazuje, że obniżanie podciśnienia poniżej tej wartości nie ma uzasadnienia tak pod względem technologicznym jak i ekonomicznym. W świetle przedstawionych rozważań, w kolejnych badaniach wytwarzano podciśnienie o wartości 0,03 MPa, mające potwierdzenie jako optymalne.

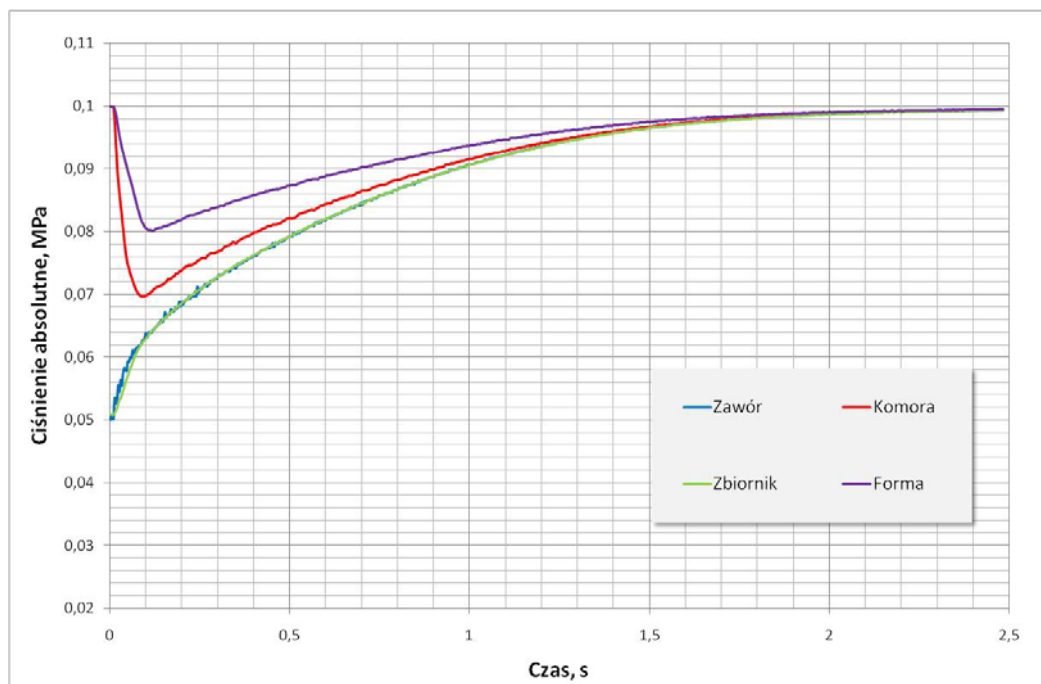
Przebiegi ciśnienia zarejestrowane w określonych punktach instalacji podczas procesu zagęszczania podciśnieniowego zamieszczono na wykresach (rys. 47 do 50).



Rys. 47. Zmiana wielkości podciśnienia podczas formowania podciśnieniowego. Ciśnienie początkowe 0,03 MPa.

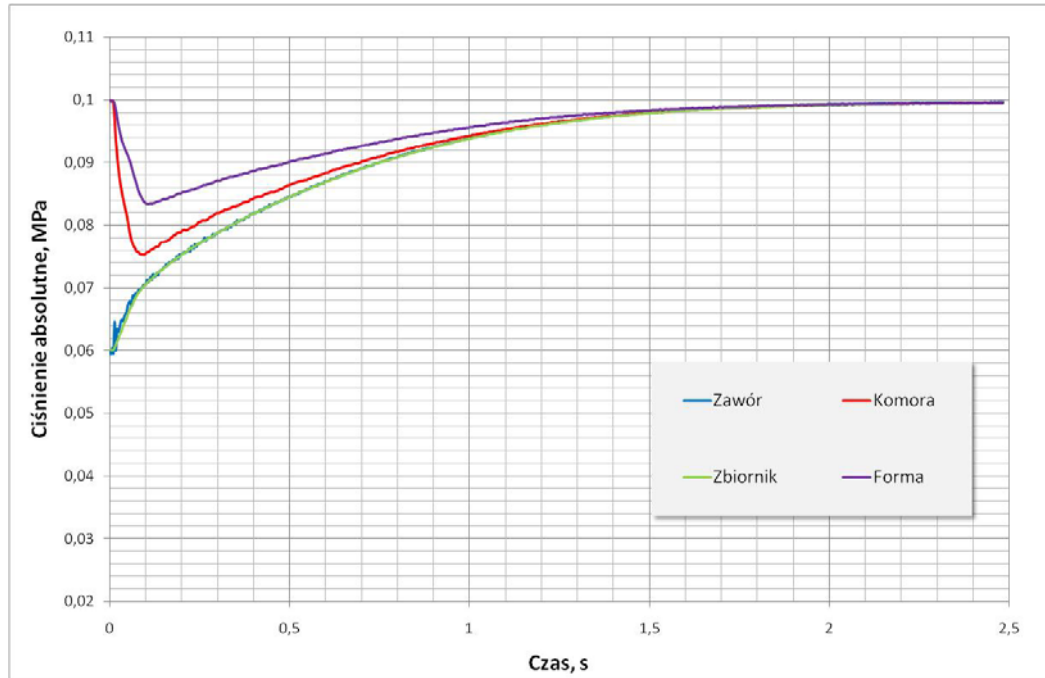


Rys. 48. Zmiana wielkości podciśnienia podczas formowania podciśnieniowego. Ciśnienie początkowe 0,04 MPa.



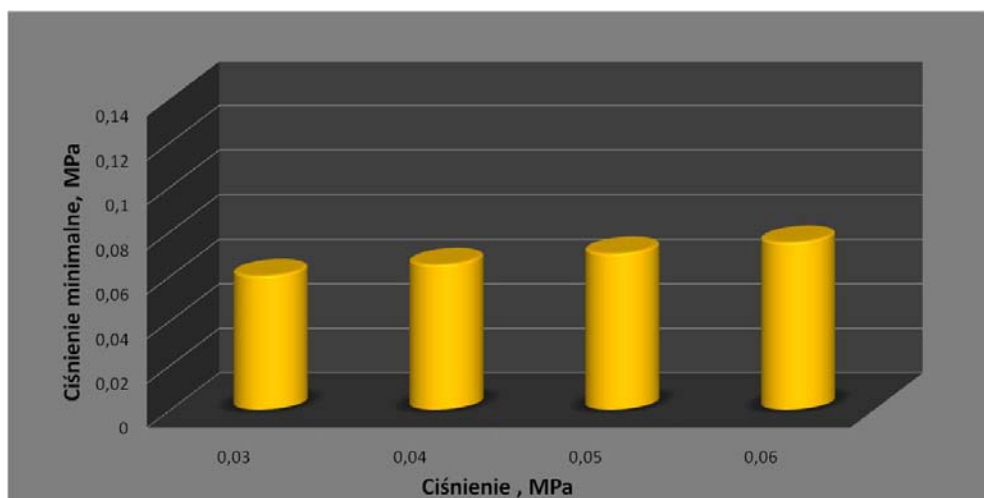
Rys. 49. Zmiana wielkości podciśnienia podczas formowania podciśnieniowego. Ciśnienie początkowe 0,05 MPa.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 50. Zmiana wielkości podciśnienia podczas formowania podciśnieniowego. Ciśnienie początkowe 0,06 MPa.

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że zmiana wielkości podciśnienia wpływa bezpośrednio na dynamikę zmniejszania ciśnienia w przestrzeni pod płytą modelową. Na rysunku 51 przedstawiono zbiorcze zestawienie wartości minimalnego podciśnienia w przestrzeni pod płytą modelową.



Rys. 51. Wartość ciśnienia minimalnego osiągnięta w przestrzeni pod płytą modelową.

6.2 Wpływ objętości zbiornika podciśnieniowego na efekty zagęszczenia masy formierskiej

Kolejną bardzo ważną wielkością, której wpływ na efekt formowania został określony, była objętość zbiornika podciśnieniowego. Instalacja na stanowisku umożliwiała zmianę objętości zbiornika w zakresie 4 wartości. Wartości te ujęte zostały w tabeli 2.

Tabela 2. Objętości zbiorników podciśnieniowych

| numer zbiornika | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|------|------|-------|-------|
| objętość, dm ³ | 4,75 | 9,42 | 14,17 | 28,75 |

Objętości zbiorników wynikały z:

- 1) cylinder mały o średnicy 110 mm i wysokości 500 mm,
- 2) objętość wynikająca z ułożenia cylindra małego wewnątrz cylindra dużego. Wartość objętości stanowiła różnicę pomiędzy objętościami cylindrów
- 3) cylinder duży o średnicy 190 mm i wysokości 500 mm
- 4) zbiornik stanowiący integralny układ z jedną z pomp

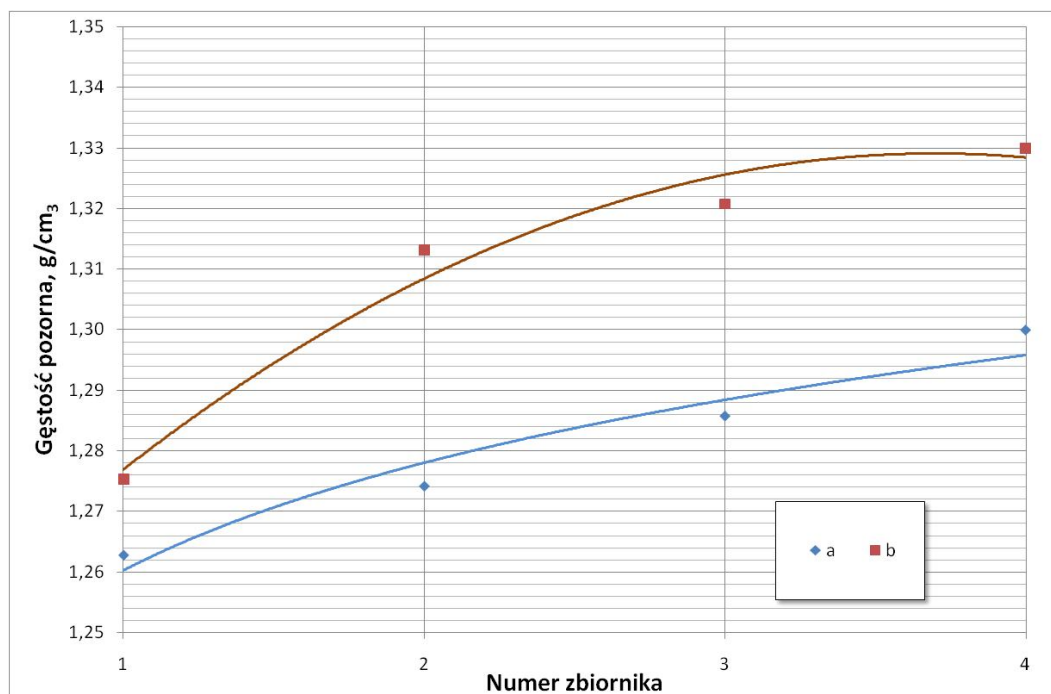
Zastosowane zbiorniki i ich ułożenie przedstawiono na rysunku 52.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 52. Zbiorniki podciśnieniowe używane podczas badań.

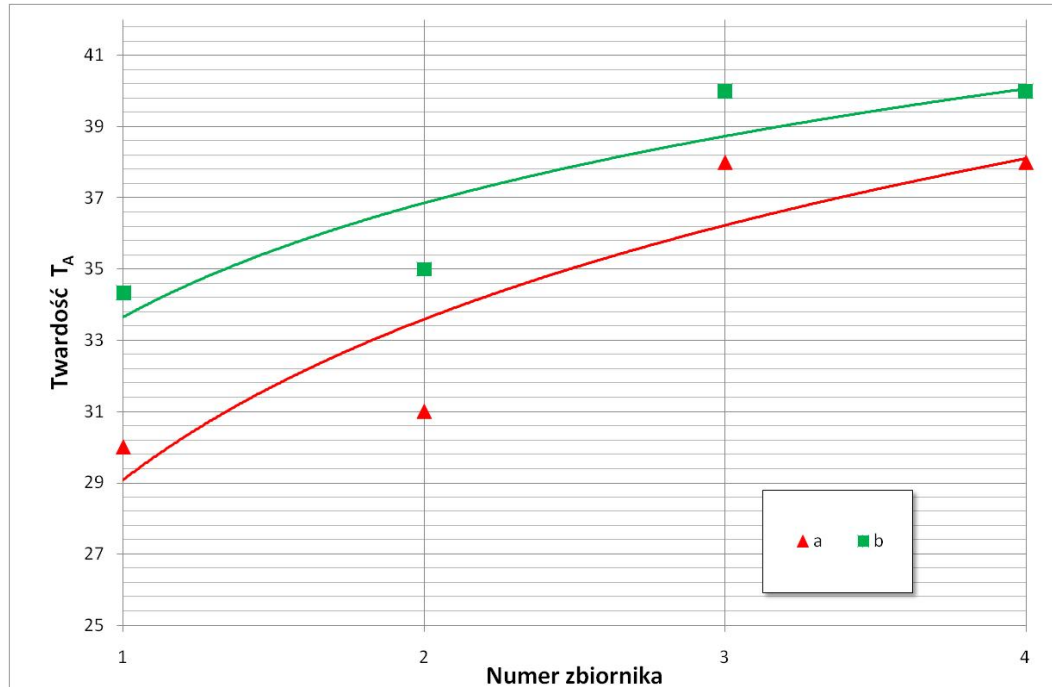
Wykorzystanie stosownej objętości zbiorników było możliwe ze względu na instalację rurową łączącą poszczególne zbiorniki i zawory kulowe stanowiące połączenia w wymaganych kanałach przepływu. Zbiorniki podciśnieniowe były podłączone do dwóch próżniowych pomp olejowych. Sterowanie pracą pomp dokonywane było za pomocą zaworów elektromagnetycznych zainstalowanych w instalacji podciśnieniowej. Zawory te zabezpieczały również pompy przed niekontrolowanym zalaniem instalacji przez olej. Obowiązująca wartość podciśnienia wynosiła 0,03 MPa, określona w poprzednim etapie badań. Stosowne wykresy ilustrujące wpływ objętości zbiorników podciśnieniowych na efekty formowania przedstawiono na rysunku 53 i 54. Wielkościami mierzonymi była gęstość pozorna oraz twardość na powierzchni formy od strony płyty modelowej.



Rys. 53. Wpływ objętości zbiornika na gęstość pozorną dla różnych wysokości słupa masy: a) 14 cm (smukłość formy 2:1), b) 21 cm (smukłość formy 3:1).

W wyniku analizy otrzymanych danych stwierdzono iż optymalną objętością zbiorników dla form używanych podczas badań na stanowisku jest łączna objętość zbiornika 1 i 2 wynosząca 14,17 dm³. Pomimo, że na wykresach wyraźnie zaznacza się wpływ większej objętości kombinacji zbiorników (nr 4) o objętości ok. 28 dm³, to nie jest to efekt, który tłumaczyłby racjonalność użycia zbiornika o takiej pojemności.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 54. Wpływ objętości zbiornika na twardość T_A dla różnych wysokości słupa masy: a) 14 cm (smukłość formy 2:1), b) 21 cm (smukłość formy 3:1).

Z wykresów można wnioskować, że w badanej instalacji objętość największego zbiornika nie wykazuje większego wpływu na stopień zagęszczenia oraz na twardość. Można to tłumaczyć zaistnieniem wąskiego gardła jakim okazała się być instalacja podciśnieniowa. Przy tak dużej ilości przepływającego powietrza, mimo dużego przekroju stawiała ona znaczny opór przepływającemu powietrzu.

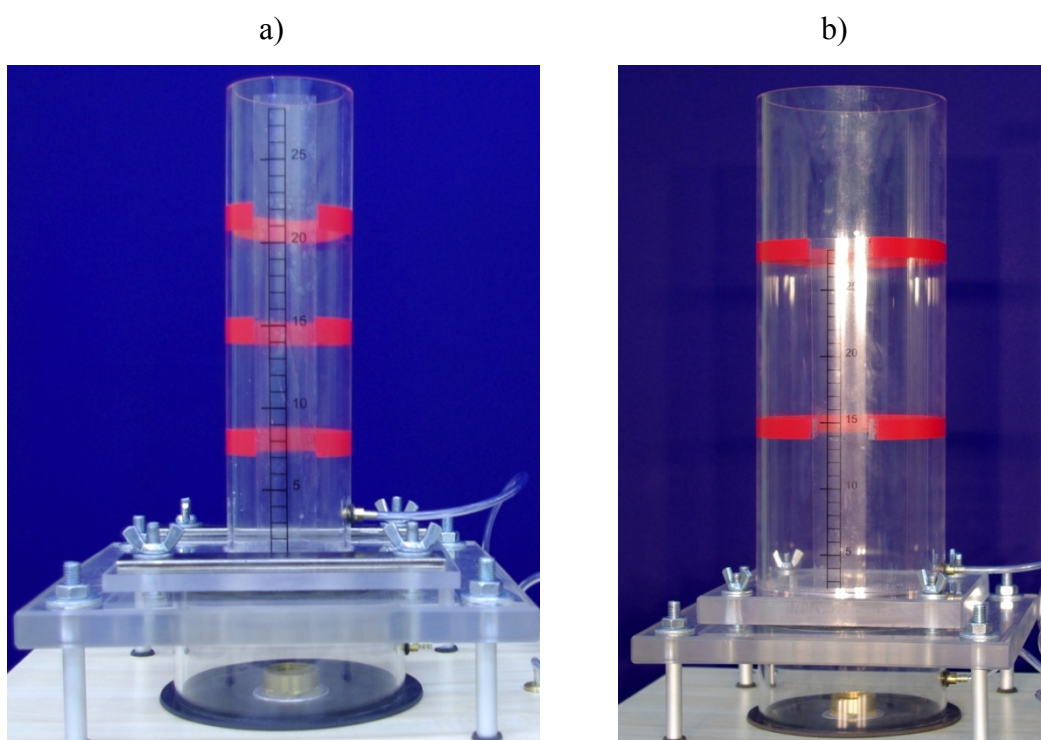
6.3 Wpływ objętości komory technologicznej i stopnia jej zapelnienia masą na efekt zagęszczenia

Kolejnym etapem badań było określenie optymalnej objętości komory technologicznej (formy) wypełnionej masą formierską dla trzech różnych wysokości, przy stałej objętości zbiornika podciśnieniowego oraz stałym ciśnieniu. Do badań użyto dwie formy z polimetakrylanu metylu (PMMA). Średnica małej formy wynosiła około 70 mm przy wysokości 300 mm a dużej 140 mm i wysokość 400 mm

(rys. 55). Dzięki przezroczystości użytego polimetakrylanu możliwa była cyfrowa rejestracja zmian wysokości masy w czasie procesu, metodą optycznego pomiaru zmian wysokości słupa masy po zagęszczeniu. Aby zachować porównywalność uzyskanych efektów zagęszczenia, postępowano następująco:

- napełnianie formy masą spulchnioną do wysokości wyznaczonej stosunkiem wysokości formy do jej średnicy czyli smukłością
- przyjęto trzy różne wartości: 1:1, 2:1 i 3:1 (zaznaczone czerwoną taśmą na formach – rys. 55)

Przykładowe zapelnienie form pokazano na rysunku 56. Ilość odpowiedzeń przypadająca na objętość formy została dobrana tak aby nie wpływała w znaczący sposób na uzyskane wyniki. Przy doborze kierowano się stosunkiem objętości formy do procentowej wartości odpowietrzenia płyty modelowej.



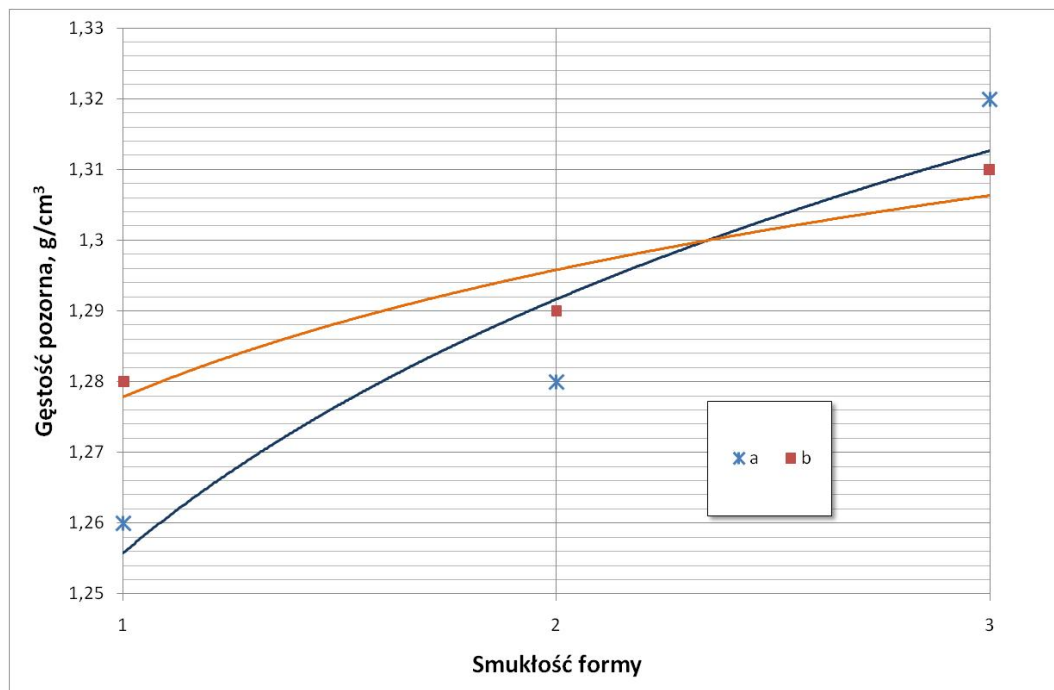
Rys. 55. Formy z PMMA z zaznaczonymi smukłościami, a) mała forma, b) duża forma

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

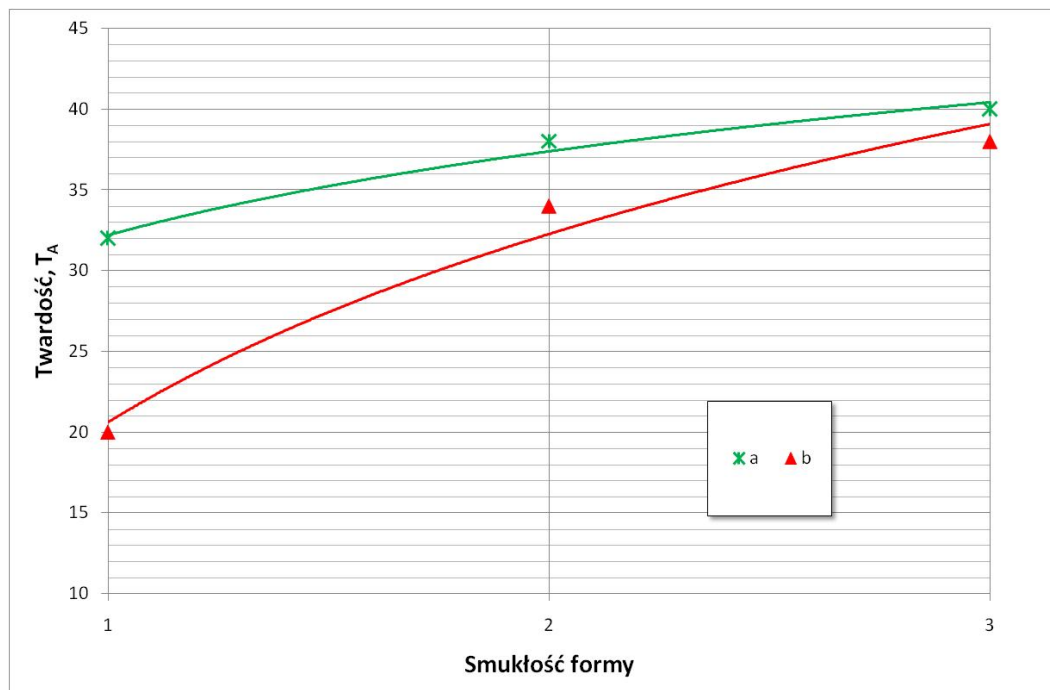


Rys. 56. Formy z PMMA wypełnione masą formierską

Efekty zagęszczenia zostały zamieszczone na rysunkach 57 i 58. Oznaczenia (1, 2, 3) na osi poziomej na wykresach oznaczają stosunki wysokości do średnicy formy – odpowiednio 1:1, 2:1, 3:1.



Rys. 57. Wpływ początkowej wysokości masy formierskiej w formie na gęstość pozorną; a – mała forma, b- duża forma

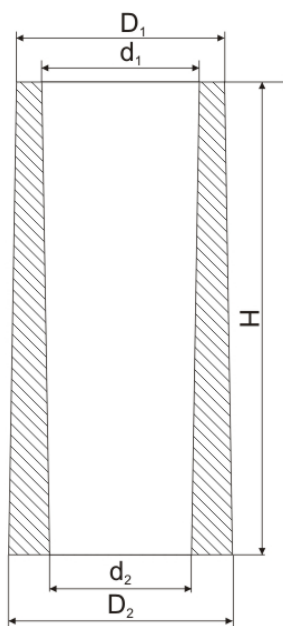


Rys. 58. Wpływ początkowej wysokości masy formierskiej w formie na twardość T_A ;
a – mała forma, b- duża forma

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić zdecydowany wpływ początkowej wysokości słupa masy na efekt zagęszczenia podczas formowania podciśnieniowego. Mała ilość masy w formie powoduje, że jej zagęszczenie jest bardzo małe. Związane jest to z dynamiką oddziaływania warstw masy na wysokości formy. Na warstwy masy położone najniżej oddziałują warstwy górne, między innymi dzięki ich sile bezwładności. W przypadku małej ilości masy w formie omawiane zjawisko praktycznie nie występuje, a efektem jest minimalne zagęszczenie w rejonach płyty modelowej. Optymalna wysokość masy w formie na podstawie przeprowadzonych badań to wysokość mieszcząca się pomiędzy punktem 2 a 3 na wykresie danych przedstawionych na rysunku 57 i 58, co wskazuje na zależność od smukłości formy.

6.4 Wpływ wielkości i kształtu geometrycznego modeli na efekty zagęszczenia i jakość odwzorowania wnętrza formy

Dotychczasowe badania były przeprowadzone bez użycia modeli. Pozwoliło to oddzielenie wpływu omodelowania na uzyskiwane wyniki zagęszczania. Badania prowadzono z zastosowaniem modeli trudnych technologicznie. Za najbardziej reprezentatywne modele uznano modele o kształcie tulei o trzech smukłościach. Wymiary poszczególnych modeli przedstawiono na rysunku 59. Modele umożliwiały również zamknięcie górnego otworu pokrywą, dzięki której zmieniał się charakter omodelowania.



| tuleja | H | D1 | d1 | D2 | d2 |
|---------|-----|----|----|----|----|
| niska | 50 | 66 | 50 | 69 | 48 |
| średnia | 100 | 66 | 50 | 70 | 46 |
| wysoka | 150 | 66 | 50 | 71 | 45 |

Rys. 59. Dane wymiarowe tulei używanych do badań.

Podczas badań, stałymi wartościami było ciśnienie – 0,03 MPa, wilgotność masy – 2,45 %, pojemność zbiornika podciśnieniowego – 14 dm³, Ponieważ objętość zajmowana przez modele była zmienna, wartością stałą dotyczącą masy formierskiej była jej wysokość w formie. Przyjęto wysokość 274 mm wysokości słupa masy, co

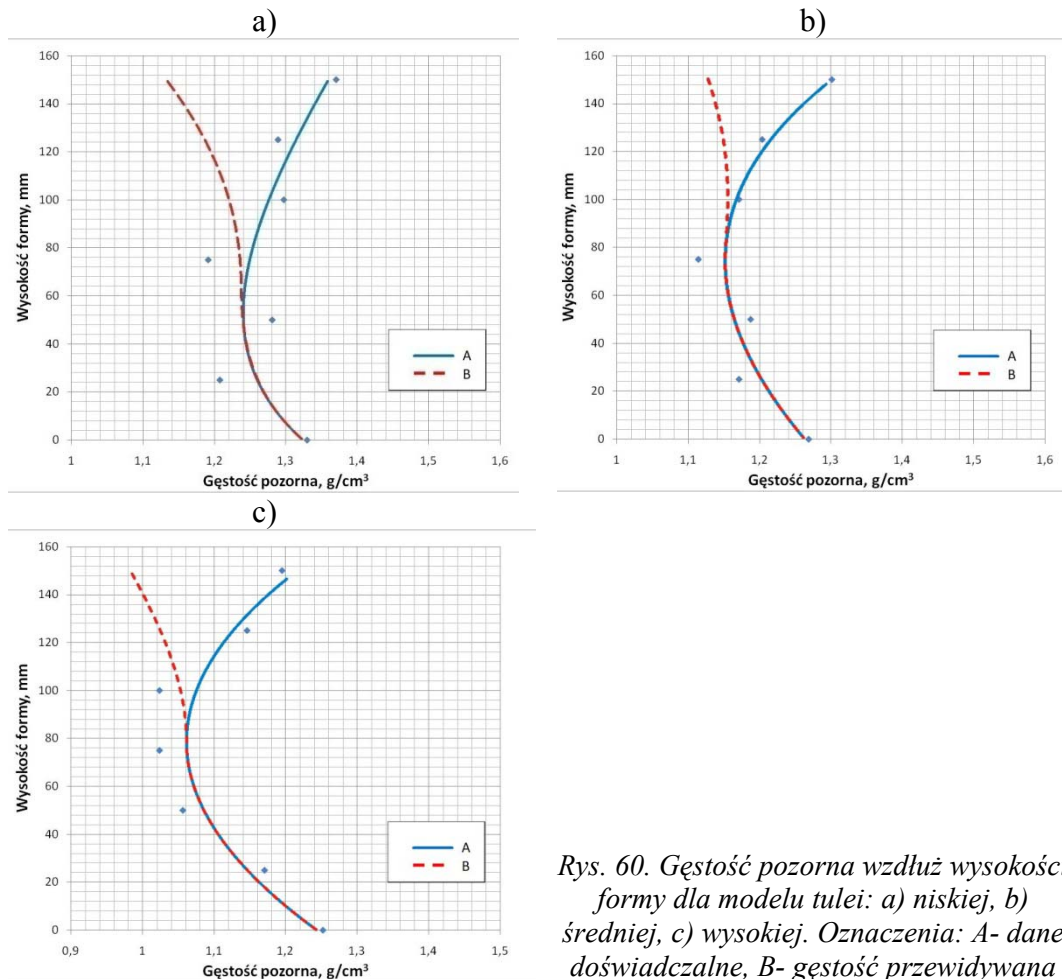
było dla formy stosunkiem smukłości 2:1. Wyniki gęstości pozornej oraz twardości T_A (pomiarzy zrobiono wewnątrz oraz na zewnątrz tulei, od strony płyty modelowej) zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Pojemności zbiorników podciśnieniowych

| Lp. | Tuleja | wysokość, cm | | masa, g | gęstość pozorna, g/cm ³ | Twardość T_A | | |
|-----|--------|--------------|---------|---------|------------------------------------------|----------------|------|----|
| | | początkowa | końcowa | | | wew. | zew. | |
| 1 | pusta | niska | 27,4 | 23,3 | 4245 | 1,24 | 30 | 12 |
| 2 | | średnia | 27,4 | 23,4 | 4160 | 1,21 | 22 | 13 |
| 3 | | wysoka | 27,4 | 23,9 | 4050 | 1,15 | 40 | 15 |
| 4 | pełna | niska | 27,4 | 23,6 | 4130 | 1,19 | - | 16 |
| 5 | | średnia | 27,4 | 24,2 | 4100 | 1,15 | - | 18 |
| 6 | | wysoka | 27,4 | 24,1 | 3700 | 1,04 | - | 15 |

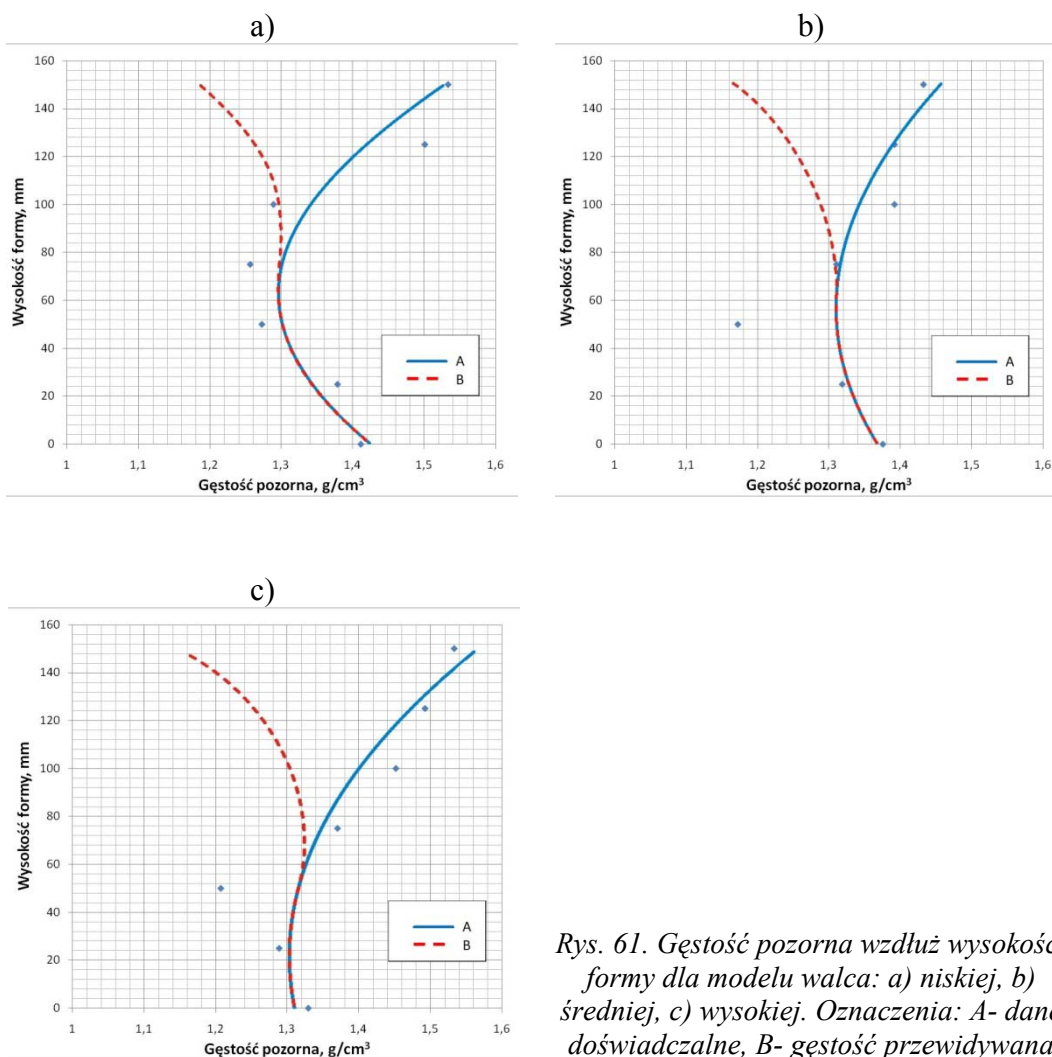
Badania jakości zagęszczenia formy przy użyciu trudnych technologicznie modeli rozszerzono o pomiar gęstości pozornej wzdłuż wysokości formy. Było to możliwe dzięki zastosowaniu sondy, w postaci metalowej rurki o średnicy 25 mm, umożliwiającej wycięcie próbek masy z formy o długości odpowiadającej wysokości masy w formie. Kolejnym krokiem było odcinanie z tak przygotowanej próbki walców masy o wysokości 25 mm. Jest to jedna z najprostszych metod do wyznaczenia gęstości pozornej wzdłuż wysokości. Wadą jest jednak efekt wtórnego zagęszczenia masy formierskiej podczas jej wypychania z sondy za pomocą tłoczka. Dlatego też we wnioskach nie brano pod uwagę efektów uzyskanych w górnej części formy, gdyż w tej części dogęszczenie masy przez nacisk tłoczka sondy było bardzo wyraźne. Na wykresach zaznaczono przerywaną linią przewidywany przebieg zagęszczenia. Wyniki uzyskane z badań przedstawiono na rysunku 60 - dla modelu tulei, oraz na rysunku 61 - dla modelu walca o zbieżności odlewniczej umożliwiającej wyjęcie modelu z formy.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 60. Gęstość pozorna wzdłuż wysokości formy dla modelu tulei: a) niskiej, b) średniej, c) wysokiej. Oznaczenia: A- dane doświadczalne, B- gęstość przewidywana

Analizując wykresy zamieszczone na rysunku 60 można stwierdzić bardzo korzystny rozkład gęstości pozornej wzdłuż wysokości formy biorąc pod uwagę fakt, że formowanie to jest traktowane jako etap wstępny w dwuetapowym procesie formowania. Na szczególną uwagę zasługuje wartość gęstości ρ_0 w trudnych technologicznie miejscach jak np. we wnętrzu tulei o dużych smukłościach (rys. 60. b i c).



Rys. 61. Gęstość pozorna wzdłuż wysokości formy dla modelu walca: a) niskiej, b) średniej, c) wysokiej. Oznaczenia: A- dane doświadczalne, B- gęstość przewidywana

Zamieszczone na rysunku 61 wykresy pokazują wartość gęstości na zewnątrz modeli walców. Wyniki również można uznać za bardzo dobre, jednakże widać wyraźnie wpływ sił tarcia pomiędzy masą formierską, a modelem i ścianami formy na efekty zagęszczenia. Spadek wartości ρ_0 jest tym większy im wyższy był badany model. Prawdopodobnie wpływa na to również wysokość słupa masy nad modelem. Im wyższy model tym mniejsza jest nad nim wysokość masy, której ilość

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

bezpośrednio decyduje o wartości ρ_0 masy formierskiej W tym przypadku rozkład gęstości nie jest już tak korzystny jak na rysunku 60.

6.5 Wpływ wielkości odpowietrzeń płyty modelowej na przebieg procesu podciśnieniowego

Parametrem decydującym o intensywności przepływu powietrza przez masę i jego odprowadzenie poza formę przez płytę modelową jest wielkość powierzchni odpowietrzenia w płycie modelowej oraz sposób rozmieszczenia korków odpowietrzających.

Podczas przepływu powietrza przez kanały odpowietrzające przestrzeń technologiczną następuje zmiana w charakterystyce strumienia. Kanały odpowietrzające definiuje się powierzchnią ich przekroju od której zależy szybkość odpowietrzania. Z uwagi na występowanie w instalacji zaworu odcinającego, pomiędzy przekrojem zaworu a powierzchnią otworów odpowietrzających istnieje zależność, którą wyznacza się z reguły doświadczalnie.

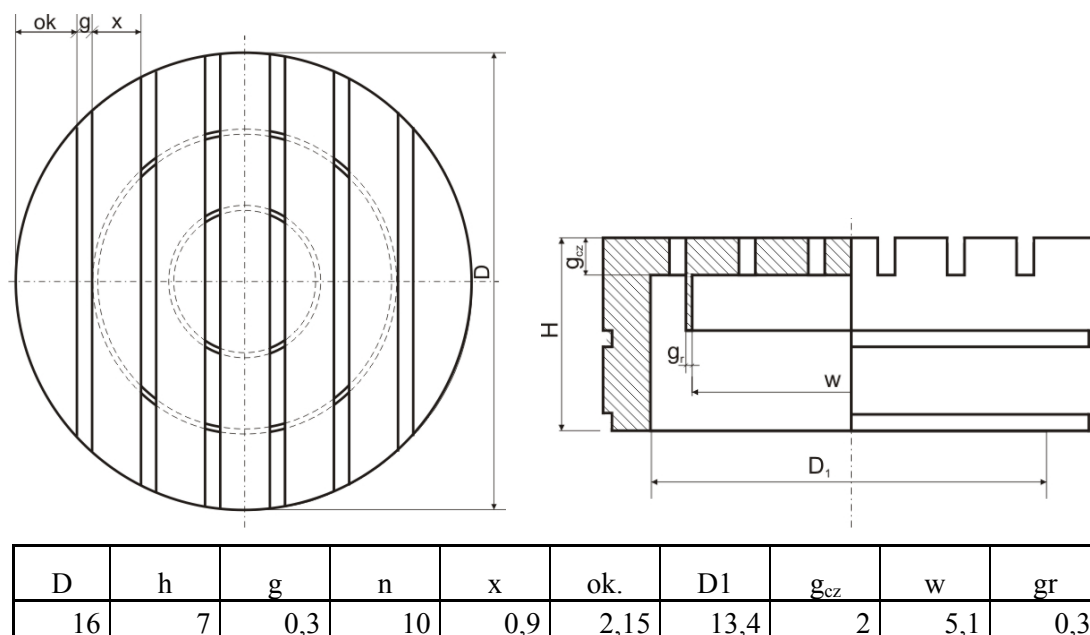
Obowiązuje reguła w myśl której powinna być zachowana zasada ciągłości przepływu i braku dławienia na etapach początkowych w stosunku do następnych licząc w kierunku do płyty modelowej.

Dla stanowiska doświadczalnego wielkości te przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Charakterystyka odpowietrzeń w formie.

| | Ilość korków | | | | | |
|--------------------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 4 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| powierzchnia odpowietrzeń, mm ² | 48,2 | 192,9 | 241,1 | 482,1 | 723,2 | 964,3 |
| stopień odpowietrzenia formy, % | 0,33 | 1,31 | 1,64 | 3,27 | 4,91 | 6,54 |
| minimalna średnica przewodu przyłącza, mm | 8 | 16 | 18 | 25 | 30 | 35 |

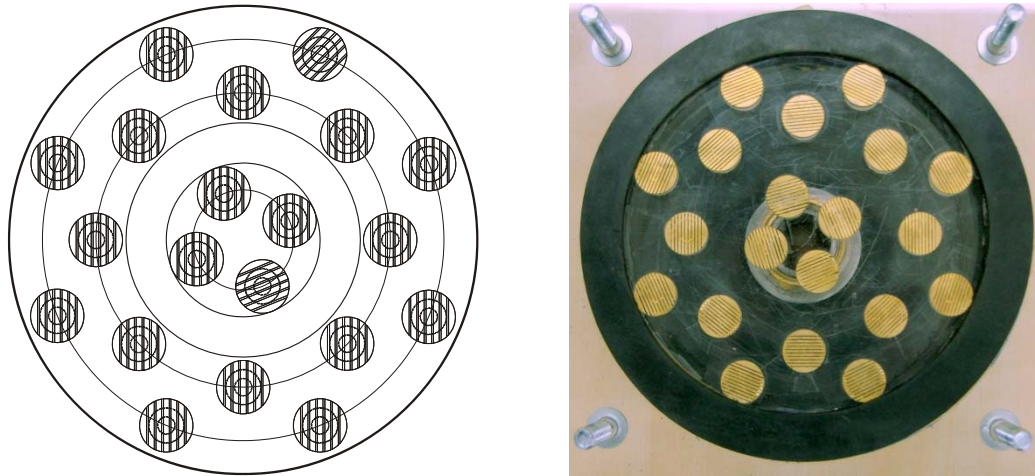
Do rozmieszczenia odpowietrzeń w płycie modelowej zastosowano metalowe korki odpowietrzające o średnicy 16 mm (rys. 62)



Rys. 62. Podstawowe dane wymiarowe korka 16 mm. Wymiary podano w mm.

Projektując ilość korków odpowietrzających wzięto pod uwagę konieczność zbadania wpływu zaworu jako wąskiego gardła na przepływ powietrza przez instalację podciśnieniową. Zawór impulsowy posiadał rzeczywisty przekrój przepływu około 750 mm². Zamontowanie 20 korków gwarantowało przeprowadzenie założonego wcześniej eksperymentu – powierzchnia odpowietrzeń w przypadku wykorzystania wszystkich korków wynosiła ponad 960 mm². Ponadto rozłożenie korków zostało tak dobrane, aby zapewnić jak najlepsze odpowietrzenie zarówno formy wypełnionej tylko masą formierską jak i formy z modelami używanymi podczas badań. Widok oraz schemat rozłożenia korków na płycie modelowej przedstawiono na rysunku 63.

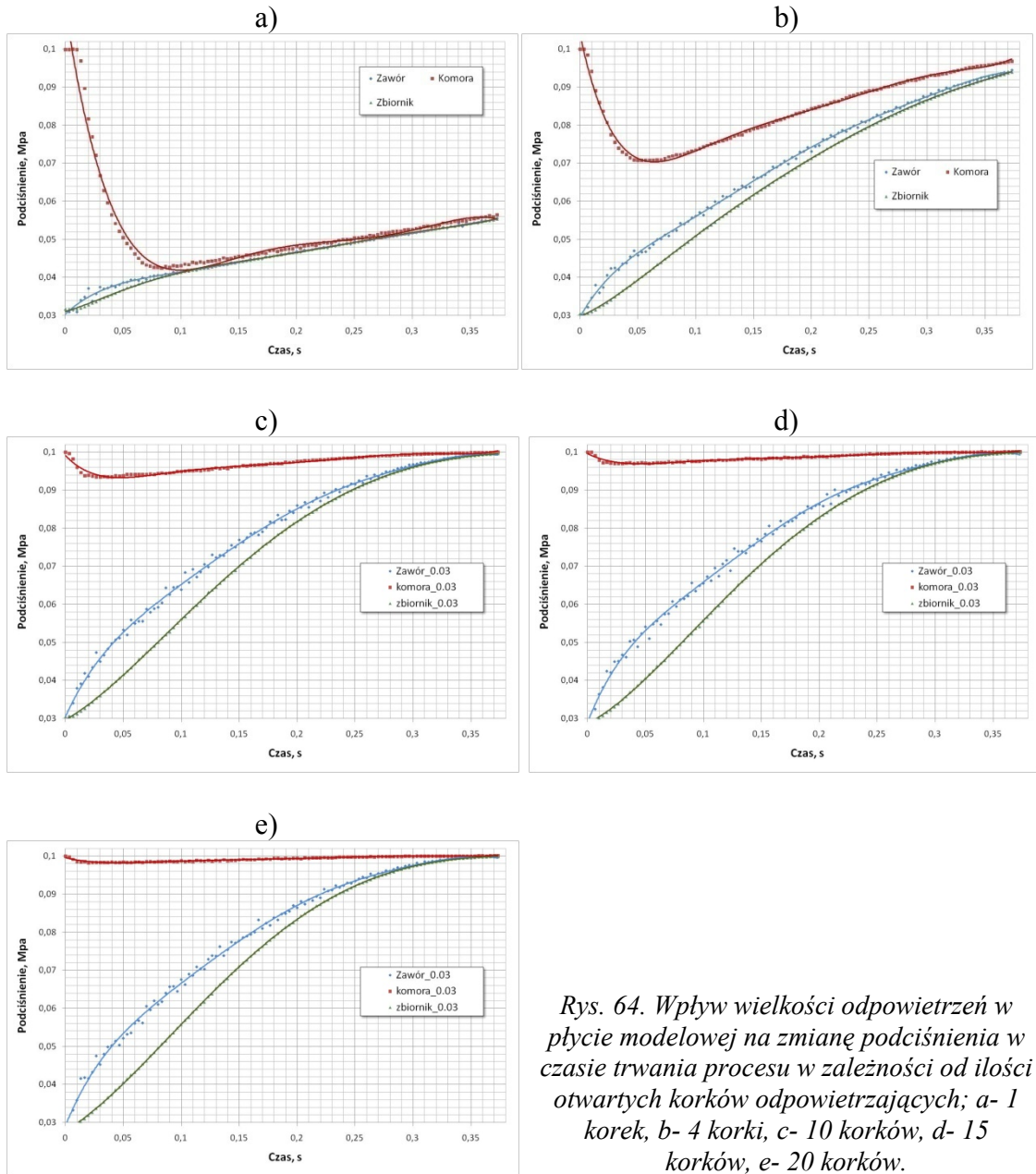
„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”



Rys. 63. Schemat oraz widok rozłożenia korków na płycie modelowej.

Doświadczenie z ilością korków przeprowadzono dla pustej komory technologicznej. Decyzja o tym spowodowana była potrzebą wyeliminowania wpływu masy formierskiej na wielkość odpowietrzeń płyty modelowej. Zmianę wielkości odpowietrzeń uzyskano poprzez przysłonięcie części otworów odpowietrzających. Wpływ ten jest trudny do określenia. Taki układ (bez masy formierskiej) zapewniał określenie zależności pomiędzy wielkością odpowietrzeń (ilością korków odpowietrzających), a przekrojem zaworu impulsowego, który jest pierwszym elementem instalacji podciśnieniowej mający bezpośredni kontakt z komorą pod płytą modelową. Badanie przeprowadzono dla stałej pojemności zbiornika podciśnieniowego – 14 dm^3 oraz stałej wartości podciśnienia $0,03 \text{ MPa}$. W badaniach nie rejestrowano danych z przetwornika podciśnienia komory technologicznej – komora miała bezpośrednie połączenie z atmosferą i nie miała wpływu na otrzymane wyniki. Wielkość powierzchni odpowietrzeń płyty modelowej oraz stopień odpowietrzenia formy w zależności od ilości korków zamieszczono w tabeli nr 4.

Wyniki badań przedstawiono na rysunku 64.



Rys. 64. Wpływ wielkości odpowietrzeń na zmianę podciśnienia w płycie modelowej na czasie trwania procesu w zależności od ilości otwartych korków odpowietrzających; a- 1 korek, b- 4 korki, c- 10 korków, d- 15 korków, e- 20 korków.

Analizując otrzymane wyniki zamieszczone na rysunku 64 można potwierdzić wpływ przekroju zaworu impulsowego na przepływ powietrza przez instalację podciśnieniową. Zwiększając ilość „czynnych” korków odpowietrzających zwiększamy tym samym powierzchnie odpowietrzeń płyty modelowej. Przy wartości około 480 mm² (rys. 64c) maleje wpływ wielkości odpowietrzeń płyty modelowej na przebieg ciśnienia - krzywa dla komory pod płytą modelową wykazuje

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

już niewielkie wychylenia. Począwszy od tego momentu widać wyraźnie wzrost oporów przepływu w zaworze impulsowym - związany jest on z jego rzeczywistym przekrojem, którego wartość jest od tego momentu mniejsza od wielkości odpowietrzeń w płycie modelowej.

Badania wykazały wpływ bardzo ważnego parametru jakim jest przekrój instalacji podciśnieniowej na przebieg ciśnienia powietrza w czasie trwania procesu. W warunkach przemysłowych, kiedy w komorze technologicznej znajduje się masa, która „zamyka” kanały odpowietrzające wpływ ten nie jest już tak wyraźny – wykazały to badania przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym z użyciem masy formierskiej. Poza zależnością świadcząca o stosunku przekroju kanałów odpowietrzających do powierzchni zaworu należy uwzględnić rozłożenie korków względem obrzeża modelu i formy. W tym przypadku należy się kierować zasadą kierunkowego przepływu masy (zagęszczenia masy) w przestrzeni pomiędzy modelem, a ścianami formy. W ten sposób dąży się do wyeliminowania przestrzeni, w których nie następuje przepływ masy, co w konsekwencji prowadziło do jej niezagęszczenia.

Wnioski

W niniejszej pracy Autor podjął się stworzenia modelu matematycznego opisującego proces przepływu powietrza w maszynie podciśnieniowej traktowanej jako urządzenie pneumatyczne, modelu który można także zastosować w badaniach symulacyjnych. Istniejące maszyny, wykorzystujące w procesie formowania omawianą metodę, nie bazują w pełni na podstawach naukowych tego procesu. W literaturze brak jest podstaw teoretycznych procesu podciśnieniowego, a stąd wynika konieczność doboru parametrów metodą prób i błędów – która z założenia jest metodą czasochłonną i nieekonomiczną.

Teza niniejszej pracy zakładała wpływ zmiany ciśnienia, jako podstawowego czynnika, na przebieg i efekty procesu zagęszczania podciśnieniowego oraz możliwość zamodelowania procesów przepływowych w instalacji pneumatycznej. Otrzymane wyniki umożliwiają ocenę dynamiki zmian ciśnienia w istotnych miejscach formierki (instalacji) podciśnieniowej, która ma wpływ na przebieg procesu formowania.

Procedura udowodnienia tezy przebiegała według założonego na początku pracy schematu. Został opracowany model matematyczny wstępnego zagęszczania podciśnieniowego, który następnie został zaadaptowany w środowisku Matlab Simulink. Środowisko to, umożliwiło przeprowadzenie symulacji badanego procesu i analityczne zweryfikowanie modelu. W celu porównania otrzymanych wyników symulacji, zaprojektowano i wykonano stanowisko laboratoryjne do badania przebiegu i efektów zagęszczania podciśnieniowego. Przeprowadzono serię badań doświadczalnych, których wyniki poddano analizie porównawczej z wynikami symulacji. Analiza ta potwierdziła słuszność założonej tezy oraz że przyjęty model matematyczny bardzo dobrze opisuje procesy przepływu powietrza

Tworząc model matematyczny procesu przepływu powietrza bazowano na stworzonym przez Autora modelu teoretycznym procesu przepływu powietrza w instalacji podciśnieniowej Model ten powstał po analizie istniejących modeli formowania nadciśnieniowego. Stosując podobne oznaczenia jak w analizowanych

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

modelach zunifikowano opis oraz oznaczenia badanego procesu. Umożliwiło to porównanie procesów oraz adaptację modelu do już istniejących maszyn formierskich wykorzystujących podciśnienie w procesie formowania. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku doświadczalnym oraz ich późniejsza weryfikacja z wynikami symulacji komputerowej potwierdziła poprawność modelu teoretycznego, a tym samym słuszność założonych podstaw teoretycznych. Jednocześnie opracowano metodykę badania zjawisk zachodzących podczas zagęszczania masy formierskiej. Ułatwi to jednoznaczną i obiektywną ocenę możliwości istniejących maszyn formierskich, w których wykorzystano podciśnienie w procesie formowania oraz ocenę działania instalacji podciśnieniowej.

Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu podciśnieniowego zagęszczania mas formierskich można stwierdzić, że została udowodniona TEZA a CEL został osiągnięty.

Analizując dostępne dane o procesach zachodzących podczas formowania z wykorzystaniem energii powietrza można stwierdzić, że w przypadku metod nadciśnieniowych, proces ten został już w dostatecznym stopniu opracowany. Istniejące publikacje omawiają wszystkie aspekty tego typu formowania pod względem naukowym i praktycznym. Zostały stworzone modele matematyczne umożliwiające optymalizację tego procesu. Z kolei proces podciśnieniowy, pomimo że jest on wykorzystywany w maszynach formierskich, nie został objęty podobną analizą.

Autor niniejszej pracy podjął się stworzenia modelu matematycznego procesu przepływu powietrza. Dzięki temu została w znaczącym stopniu wypełniona kolejna luka w naukowych teoriach. Charakterystyka stworzonego modelu, jego otwartość i możliwość adaptacji (co zostało wykazane w niniejszej pracy) umożliwia jego rozwinięcie o kolejne parametry procesu podciśnieniowego.

Analiza wyników uzyskanych podczas badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej umożliwi dobór parametrów konstrukcyjnych w instalacjach podciśnieniowych maszyn formierskich. Parametrami tymi są między innymi:

- objętość zbiornika podciśnieniowego

- przekrój instalacji podciśnieniowej
- czas otwarcia zaworu podciśnieniowego
- wielkość i rozmieszczenie odpowietrzeń płyty modelowej
- wielkość podciśnienia powietrza
- czas trwania procesu formowania
- wielkość komory technologicznej
- ilość masy w komorze technologicznej

Podczas projektowania maszyny formierskiej wykorzystującej proces zagęszczania podciśnieniowego uważany za etap wstępny formowania masy formierskiej, należy kierować się zasadą optymalizacji poszczególnych parametrów. Przeprowadzenie symulacji dla każdego przypadku pozwala na optymalny dobór wymienionych parametrów, bez konieczności budowania instalacji, zmniejszając koszty związane z eksperymentami do minimum. W obecnych czasach przeprowadzanie optymalizacji metodą prób i błędów nie ma żadnego uzasadnienia ekonomicznego.

Rezultaty badań świadczą o przydatności zagęszczania podciśnieniowego w formowaniu skrzynkowym jako metody wstępnego zagęszczania - rozszerzającej zakres możliwości obecnie stosowanych maszyn. Jest to zgodne z tendencją wielowariantowej pracy współczesnych formierek.

Formowanie to zapewnia uzyskanie odpowiedniego zagęszczenia w trudnych technologicznie rejonach formy, takich jak wąskie, długie szczeliny o dużej smukłości. Poza tym można zauważyć równomierny rozkład zagęszczenia w dolnej i środkowej części formy, dobre odwzorowywanie modelu (dobre zagęszczenie masy w strefie przymodelowej), możliwość stosowania modeli posiadających głębokie szczeliny, zwiększenie dokładności wymiarowej odlewów, małe zapylenie na stanowisku formowania (hermetyzacja procesu), małe zużycie modeli oraz niski poziom emisji hałasu – poniżej 85 dB.

Stworzony model matematyczny uwzględnia podstawowe parametry procesu podciśnieniowego przepływu powietrza. Jednakże złożoność tego procesu powoduje konieczność dalszych badań, w których będą uwzględnione kolejne parametry

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

procesu. Każdy proces, który zostaje opisany za pomocą wzorów matematycznych zostaje w pewien sposób uproszczony. Spowodowane jest to jego naturą, która jest na tyle skomplikowana, że nie ma fizycznej możliwości zarejestrowania wszystkich zmian zachodzących podczas procesu. W miarę rozwoju techniki rejestracji danych i ich późniejszej obróbki komputerowej, wiedza na temat procesu będzie coraz większa, a model go opisujący coraz doskonalszy.

Poniżej przedstawiono wnioski końcowe pracy:

- ✓ opracowany model matematyczny bardzo dobrze opisuje proces podciśnieniowego masy przepływu powietrza
- ✓ decydujący wpływ na efekt zagęszczenia ma dynamika zmian ciśnienia występujący na warstwach masy formierskiej
- ✓ proces formowania podciśnieniowego jako wstępny etap zagęszczenia ma swoje uzasadnienie w przypadku trudnych technologicznie modeli
- ✓ model matematyczny oraz stanowisko doświadczalne pozwalają na dobór optymalnych parametrów przepływu powietrza w instalacjach podciśnieniowych
- ✓ symulacja komputerowa procesów przepływu ma swoje uzasadnienie praktyczne i ekonomiczne

Literatura

- 1 Aksjonow P.N.: *Sposób analitycznego ujęcia pracy nadmuchiwarek*. Przegląd Odlewnictwa 1, 1959 r., str. 61-66.
- 2 Bast J., Kamen N.: *Using the Air-Flow Moulding Machine (Seiatsu Process) – the way for increasing of Casting*. I Konferencja Tendencje Rozwojowe w Mechanizacji Procesów Odlewniczych. Kraków, 1994 r. str. 47-52.
- 3 Bast, J., Muschna, M.; *Mathematische Modellierung der Luftstrompreßverdichtung zur Optimierung der Grünsandformherstellung*. Proceedings of the 61st World Foundry Congress, 24.-29. September 1995 Beijing, China
- 4 Barycki J., Ganczarek M., Kollek W., Mikulczyński, T.: *Badania dynamiki napędu udarowego z samoczynnym zaworem impulsowym*. Pneumatyka nr 4, 2002 r., str.12-13.
- 5 Barycki J., Kollek W., Mikulczyński T., Nowak D.: *Modelowanie dynamiki jednozaworowej głowicy impulsowej*. Pneumatyka nr. 3, 2004 r., str. 4-5
- 6 Dańko J.: *Proces wytwarzania rdzeni i form odlewniczych metodami dmuchowymi. Badania i teoria*. Zeszyty naukowe AGH nr 145, Kraków 1992 r.
- 7 Dańko J., Smyksy K.: *Perspektywy rozwoju skrzynkowych maszyn formierskich w świetle analizy aktualnych metod zagęszczania*. Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Technicznej "Eksploracja i unowocześnianie wyposażenia odlewni", Kutno, 1996 r., str. 21- 33.
- 8 Dańko J., Fedoryszyn A., Bodzoń L., Smyksy K.: *The Present State and Modern Trends of Automatic Foundry Lines Development*. Acta Metallurgica Slovaca, 3, 1997 r., str. 200 - 206.
- 9 Dańko J., Fedoryszyn A., Gregoraszczyk M.: *Wybrane zagadnienia badań i eksploatacji maszyn odlewniczych*. Aplikacje badań naukowych w budowie maszyn. Kraków, AGH, 2000 r.. str. 17-26
- 10 Fleming E., Tilch W.: *Formstoffe und Formverfahren*. DVG, Leipzig-Stuttgart 1993r.
- 11 Fedoryszyn A., Smyksy K.; Dańko J.: *Techniki formowania stosowane w odlewnictwie światowym*. Materiały II Konferencji TECHNICAL'99. Nowa Sól 1999 r.
- 12 Fedoryszyn A., Smyksy K., Dańko J.: *Techniki formowania stosowane w odlewnictwie światowym*. „Nowoczesne techniki formowania” II Konferencja Odlewnicza TECHNICAL'99 : Nowa Sól 1999 r., str. 7-18
- 13 Ganczarek M., Ciskowski S., Mikulczyński T.: *Model matematyczny dynamicznego prasowania mas formierskich*. Przegląd Odlewnictwa 9.2006 r. str. 464 – 470.
- 14 Ganczarek M., Ciskowski S., Mikulczyński T.: *3D model of impulse compaction of moulding sands model*. Archives of Foundry Engineering. 2007 vol. 7, iss. 1, str. 47-50.
- 15 Ganczarek M., Kollek W., Mikulczyński T.: *Badania symulacyjne i eksperymentalne procesu dynamicznego prasowania mas formierskich*. Arch. Odlew. 2002 R. 2 nr 6 str. 55-60.
- 16 Gerc E.W.: *Dinamika pniewmaticszech sistem maszin..* Maszgiz, Moskwa 1985.
- 17 Gregoraszczyk M.: *Maszynoznawstwo odlewnicze*. Wydawnictwo AGH, Kraków 1994
- 18 Hespers W., Lustig M.: *Systematic planning of investments in moulding plants, allowing for technical and organizational developments*. Casting plant and Technology, nr 4, 1988, s.14-23.
- 19 Kamiński Z.: *Wyznaczanie współczynnika wydatku przewodów pneumatycznych*. Pneumatyka, nr 3, 2008 r., str.33-36
- 20 Kiczkowski T., Linsztet W.: *Optimisation of high speed pneumatic cylinder drive use differential model of E.W.Gerc*. XVI Konferencja Polioptymalizacja i CAD'98. Mielno 1998, ss15/16
- 21 Kulesza Z.: *Modelowanie pneumatycznego układu hamulcowego z zaworem przełącznikowo-sterującym*. Pneumatyka, nr 1, 2008 r., str.58-61
- 22 Kollek W., Mikulczyński T. Nowak D.: *Badania symulacyjne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich*. VI Konferencja Odlewnicza Technical 2003, Nowa Sól 2003 r.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

- 23 Lewandowski J. L.: Tworzywa na formy odlewnicze, Wydawnictwo Akapit, Kraków, 1997
- 24 Praca zbiorowa pod redakcją J.L.Lewandowskiego: *Materiały Formierskie - Laboratorium*. Wydanie czwarte, poszerzone i uzupełnione. Skrypt Uczelniany Nr 1500, Wydawnictwa AGH, Kraków 1997.
- 25 Malaschkin A., Bast J.: Moderne Formmaschinen und -verfahren, Gießerei-Praxis No. 4, 2004 r., str. 139 – 150.
- 26 Malaschkin A., Bast, J.; *Neue Meßmethode zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle von tongebundenen Formen auf mechanisierten Formanlagen bei Form- und Guss Herstellung mit tongebundenen Formstoffen*, Gießerei-Praxis (2003), Nr. 11
- 27 Materiały prospektowe, strony WWW: *DOZAMET, DISA, HAFLINGER, HEINRICH WAGNER SINTO, KÜNKEL WAGNER, SAVELLI, TECHNICAL*.
- 28 Mikulczyński T., Naplocha K., Nowak D.: *Modelowanie procesu dynamicznego zagęszczania mas formierskich*. Tendencje rozwojowe w mechanizacji procesów odlewniczych, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, vol. 24 nr 3, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004 r.
- 29 Mikulczyński T., Bogdan M., Fita S., Ciskowski S. Dworzak Ł.: *Wybrane badania symulacyjne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich*. XI Konferencja Odlewnicza TECHNICAL 2008. Nowa Sól 2008. str. 55-60.
- 30 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, str. 211-214.
- 31 Mikulczyński T., Ganczarek M.: *Badania symulacyjne procesu dynamicznego prasowania mas formierskich*. Acta Metall. Slovaca 2002 Roc. 8 mimoriad. cis. 2 nr [1]
- 32 Mikulczyński T., Ganczarek M.: *Dynamiczne prasowanie mas formierskich*. III Polski Kongres Odlewnictwa. Zbiór materiałów. Prodlaw Warszawa, Zakład Odlewnictwa PWarsz., STOP Oddział Warsz. Warszawa, 2000 r. str. 191-196.
- 33 Mikulczyński T.: *Zastosowanie pneumatycznego napędu udarowego do dynamicznego prasowania mas formierskich*. Przegląd Odlewnictwa. 2001 t. 51 nr 1, str. 12-14,
- 34 Razumow I.M.: *Fluidyzacja i transport materiałów sypkich*. WNT, Warszawa 1975
- 35 Renker, D., Tilch, W.; Bast, J.: *Praktische und theoretische Untersuchungen pneumatischer Kern- und Formherstellungsverfahren*. Gießerei-Praxis (2000) Nr. 9, str. 389 – 394.
- 36 Rościszewski J.: *Aerodynamika stosowana*. Wydawnictwo MON 1957
- 37 Smyksy K.: *Technologiczne aspekty formowania impulsowego*. Krzepnięcie Metali i Stopów nr 25, 1995 r., str.47- 52.
- 38 Smyksy K.: *Modelowanie pracy impulsowej maszyny formierskiej* W: PNEUMA'2000 : XII krajowa konferencja „Płynowe systemy zasilające, napędowe i sterujące”, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2000 r. (Zeszyty Naukowe / Politechnika Świętokrzyska. Elektryka ; 39). Kielce — str. 299–306
- 39 Smyksy K.: *Pomiary impulsowych maszyn formierskich*. Prace Naukowe I.T.M. i A. PWr. nr 52, 1993 r., str. 279- 282.
- 40 Smyksy K.: *Problematyka doboru parametrów impulsowych maszyn formierskich* Przegląd Odlewnictwa. — 2001 t. 51 nr 7-8 str. 262–269
- 41 Smyksy K.: *Porównanie metod formowania strumieniowego*. V Konferencja Odlewnicza, Technical 2002. Nowa Sól 2002 r.
- 42 Smyksy K.: *Modelowanie pracy impulsowej maszyny formierskiej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Elektryka 39, 2000 r. str. 299–306.
- 43 Smyksy K., Makohonko K., Ślęzyk M., Szablowski M.: *Badanie i analiza wybranych współczesnych metod formowania*. V Konferencja odlewnicza Technical 2002, Nowa Sól 2002 r., str. 59–60.

- 44 Smyksy K., Dańko J., Fedoryszyn A.: *Współczesne maszyny do zagęszczania syntetycznych mas formierskich, Modern machines for compaction of clay bonded sand*. Krzepnięcie Metali i Stopów, Solidification of Metals and Alloys. Rzeszów 1999 R. 1 nr 41 str. 59–67 [tekst pol.], 184–185 [tekst ang.]
- 45 Smyksy K., Dańko J., Fedoryszyn A.: Zagadnienie oceny efektów formowania VI Konferencja Odlewnicza TECHNICAL 2003 : Nowa Sól 2003 r. str. 42–51.
- 46 Snopkiewicz T., Smyksy K.: *Koncepcja mobilnego, mikroprocesorowego systemu do podstawowych pomiarów maszyn formierskich*. Biuletyn Konferencyjny IX Konferencji Odlewniczej TECHNICAL 2006 Nowa Sól 2006 r. str. 105–114.
- 47 Snopkiewicz T.: *Mikroprocesorowy system do pomiarów wstrząsowo-prasujących maszyn formierskich*. Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego AGH Kraków, 2006 nr 9, str. 85-93.
- 48 Ślęzyk M.: *Badanie procesu formowania podciśnieniowego*. Praca magisterska, Wydział Odlewnictwa AGH, Kraków 2001. promotor – dr inż. Krzysztof Smyksy
- 49 Ślęzyk M., Smyksy K., Chrobot E.: *Wizualizacja procesu formowania podciśnieniowego*. X Konferencja odlewnicza TECHNICAL, Nowa Sól 2006 r.: str. 83–92.
- 50 Ślęzyk M.: *Badanie wybranych aspektów procesu formowania podciśnieniowego*. III Międzynarodowa Konferencja „Tendencje rozwojowe w mechanizacji procesów odlewniczych”. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji ,Vol. 24, numer 3 specjalny. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2004.
- 51 Ślęzyk M.: *Analiza wybranych aspektów formowania podciśnieniowego*. Archiwum Odlewnictwa 2004 R. 4 nr 11 t. 2 str. 257–262.
- 52 Ślęzyk M, Smyksy K.: *Analysis of basic phenomena occurring in the vacuum-assisted moulding process*. IV Międzynarodowa Konferencja „Tendencje rozwojowe w mechanizacji procesów odlewniczych”. Archives of Metallurgy and Materials, ISSN 1733-3490Vol. 52, 3/2007, Kraków, str.453-465.
- 53 Ślęzyk M., Smyksy K.: *Analiza aktualnego stanu techniki próżniowej. Wybrane aspekty zastosowania w urządzeniach odlewniczych*. VII Konferencja TECHNICAL’04. Nowa Sól 2004 r., str. 129–137.
- 54 Ślęzyk M., Smyksy K.: *Badania wybranych metod formowania podciśnieniowego*. XXIX konferencja naukowa z okazji Święta Odlewnika 2005. Kraków 2005. [Kraków : WO AGH, 2005]. str. 57–62
- 55 Ślęzyk M., Smyksy K.: *Basic features of vacuum assisted moulding*. Technologické Inžinierstvo. ISSN 1336-5967 - Tatranské Zruby 2007 r., str. 43–44.
- 56 Ślęzyk M., Smyksy K.: *General characteristics of vacuum assisted moulding processes*. Wyd. Pneumatyka (6)2006. ISSN 1426-6644 - 2006 nr 6 str. 20–23.
- 57 Ślęzyk M., Smyksy K.: *Model approach to the vacuum-assisted moulding process*. Acta Metallurgica Slovaca ; ISSN 1335-1532. 2007 Roč. 13 spec. iss. 4 str. 164–170.
- 58 Ślęzyk M., Smyksy K.: *Modele przepływu powietrza w formierkach podciśnieniowych*. XXX konferencja naukowa z okazji Święta Odlewnika 2006, Kraków 2006 r., str. 29-34.
- 59 Ślęzyk M., Smyksy K.: *The basic parameters of vacuum assisted moulding*. Archives of Foundry. - 2006 R. 6 nr 18 (2/2) str. 489–494.
- 60 Ślęzyk M., Ziółkowski E., Smyksy K.: *Rozwiązania techniczne układów do pomiaru ciśnienia w systemach formowania podciśnieniowego*. XI Konferencja odlewnicza TECHNICAL 2008, Nowa Sól 2008 r., str. 47-54.
- 61 Ślęzyk M., Smyksy K.: *Symulacja przepływu powietrza w formierkach podciśnieniowych*. XXXI konferencja naukowa z okazji Święta Odlewnika 2007. Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, 2007. - ISBN 978-83-60958-03-2. - str. 79–83.

„Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego”

- 62** Ślęzyk M: *Badanie i analiza metod formowania podciśnieniowego*. Praca własna AGH nr 10.10.170.219
- 63** Winartomo B., Vroomen U., Bührig-Polaczek A., Pelzer M.: *Multiphase modeling of core shooting process*. International Journal of Cast Metals Research 2005 Vol. 18 No. 1