

PR AC A DO KT OR SK A

**MODELOWANIE MATEMATYCZNE
I EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA
PROCESU IMPULSOWEGO
ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH**

Daniel Nowak

**Słowa kluczowe: masa formierska, impulsowe zagęszczenie,
model matematyczny, badania
symulacyjne, badania eksperymentalne**

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz MIKULCZYŃSKI

SPIS TREŚCI

| | |
|---|-----------|
| 1. WSTĘP. | 4 |
| 2. IMPULSOWE ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH. | 6 |
| 2.1. Jednostopniowy proces impulsowy. | 8 |
| 2.2. Dwustopniowy proces impulsowy. | 12 |
| 2.3. Proces impulsowy ze sterowanym przebiegiem zmian ciśnienia. | 13 |
| 2.4. Proces impulsowy z „elastycznym” sterowaniem procesu zagęszczania. | 14 |
| 3. MODELE MATEMATYCZNE PROCESU DYNAMICZNEGO ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH. | 16 |
| 3.1. Model G.M. Orlova. | 16 |
| 3.2. Model J. Basta. | 22 |
| 3.3. Model K. Smyksego. | 29 |
| 3.4. Podsumowanie. | 32 |
| 4. TEZA I CELE PRACY. | 34 |
| 5. MODELOWANIE PROCESU IMPULSOWEGO ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH. | 36 |
| 5.1. Głowica impulsowa z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym. | 36 |
| 5.2. Model matematyczny dynamiki głowicy GI-2. | 38 |
| 5.3. Model matematyczny procesu odkształcania i zagęszczania masy formierskiej. | 40 |
| 6. BADANIA SYMULACYJNE I EKSPERYMENTALNE GŁOWICY GI-2. | 47 |
| 6.1. Badania symulacyjne dynamiki głowicy impulsowej. | 47 |
| 6.2. Badania procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. | 49 |
| 6.3. Analiza wyników badań głowicy impulsowej. | 54 |
| 7. BADANIA PROCESU IMPULSOWEGO ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH. | 55 |
| 7.1. Badania symulacyjne modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. | 56 |
| 7.2. Badania eksperymentalne dynamiki procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. | 67 |
| 7.3. Analiza wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. | 81 |
| 8. WNIOSKI. | 84 |
| LITERATURA. | 87 |

| | |
|---|------------|
| ZAŁĄCZNIK A. SCHEMAT MODELU SYMULACYJNEGO DYNAMIKI GŁOWICY IMPULSOWEJ. | 92 |
| ZAŁĄCZNIK B. SCHEMAT MODELU SYMULACYJNEGO PROCESU IMPULSOWEGO ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH. | 101 |

1. WSTĘP

Odlewanie w formach piaskowych jest nadal podstawową technologią stosowaną do wytwarzania odlewów [9][17][54]. Natomiast podstawową metodą wytwarzania form piaskowych (zagęszczania mas formierskich) jest prasowanie [1][2]. W praktyce są stosowane różne jego odmiany – prasowanie płytą, głowicą wielotłoczkową czy też strzelarką [8][34][60]. Wciąż rosnące wymagania odnośnie do jakości wytwarzanych odlewów, a zatem i form w których są wykonywane, spowodowały że w ostatnich latach nastąpił znaczący rozwój nowych metod wytwarzania piaskowych form odlewniczych. Należą do nich nowe odmiany prasowania, do których należy zaliczyć: metodę impulsową oraz dynamicznego prasowania płytą [12][21][37][41][42][43]. Wymienione metody można zaliczyć do grupy metod formowania dynamicznego. Przez formowanie dynamiczne rozumie się zagęszczenie masy formierskiej realizowane w bardzo krótkim czasie, rzędu kilku do kilkunastu milisekund. Cechą charakterystyczną tej grupy metod jest dynamiczne oddziaływanie czynnika zagęszczającego – strumienia sprężonego powietrza lub płyty prasującej – na masę formierską, co pozwala na uzyskiwanie bardzo dużej szybkości deformacji masy i, w rezultacie, jej efektywne zagęszczenie. Taki sposób zagęszczania umożliwia wykorzystanie tiksotropowych właściwości kwarcowo-iłowych mas formierskich do osiągnięcia bardzo dużego stopnia ich zagęszczenia [7][35]. Stąd do zalet metod dynamicznego zagęszczania należy zaliczyć [15][16]:

- wysoki stopień zagęszczenia masy formierskiej,
- dużą jednolitość stopnia zagęszczenia masy formierskiej w całej objętości formy.

Wysoka jakość form wytwarzanych metodami dynamicznymi skutkuje w praktyce:

- dużą dokładnością wymiarową form,
- dobrą jakością powierzchni form oraz
- zwiększoną dokładnością odwzorowania skomplikowanych kształtów modeli.

Projektowanie i optymalizacja procesu dynamicznego zagęszczania mas formierskich wymaga znajomości modelu matematycznego oraz wyników badań symulacyjnych modelu procesu zagęszczania mas formierskich. Niestety, złożoność zjawisk zachodzących podczas dynamicznego zagęszczania mas formierskich sprawia, że dotychczas nie opracowano modelu matematycznego w pełni opisującego przebieg

procesu dynamicznego zagęszczania, chociaż próby modelowania podejmowało wielu badaczy na całym świecie, m.in. G.M. Orlov [49], J. Bast [4] i K. Smyksy [56].

Wszystkie opracowane dotychczas modele nie zawierają kompleksowego opisu procesu dynamicznego zagęszczenia mas formierskich, a przyjęte w nich zbyt duże uproszczenia powodują, że wyniki badań symulacyjnych tych modeli nie dostarczają informacji dotyczących opisu, choćby w sposób przybliżony, procesu dynamicznego zagęszczania. Zatem, znane z literatury modele i ich badania symulacyjne nie znalazły w praktyce zastosowania do projektowania i optymalizacji procesu dynamicznego zagęszczania mas formierskich. Wobec powyższego autor pracy podjął próbę opracowania modelu matematycznego w pełni opisującego proces dynamicznego (impulsowego) zagęszczania mas formierskich, którego badania symulacyjne będą dostarczały wyników zgodnych z wynikami badań eksperymentalnych. W założeniu autora taki model umożliwi dokładne poznanie i wyjaśnienie mechanizmu zagęszczania mas formierskich oraz dostarczy projektantom narzędzie do projektowania i optymalizacji głowic impulsowych maszyn formierskich oraz procesu impulsowego zagęszczania mas.

Podstawę do opracowania modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich będą stanowiły:

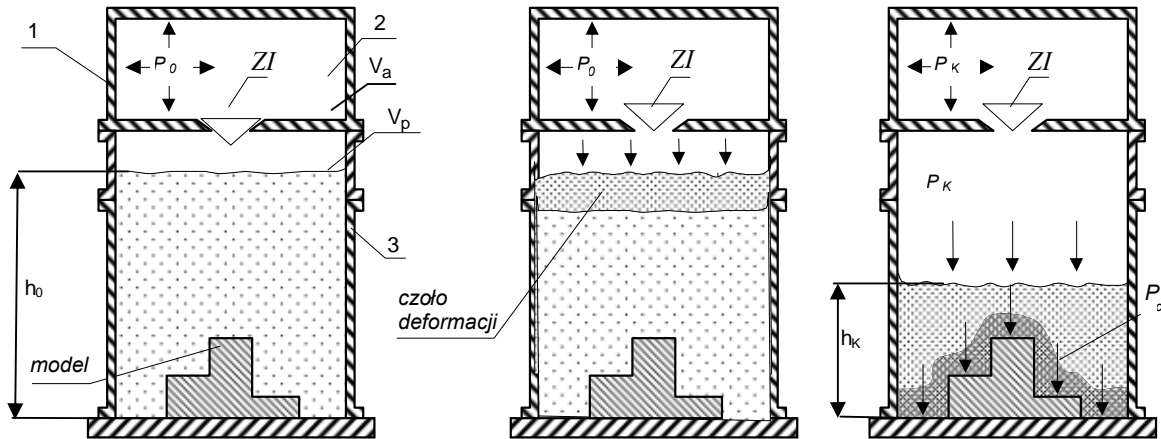
- model matematyczny dynamiki głowicy impulsowej maszyny formierskiej,
- model matematyczny procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej, który sformułowano na podstawie modelowania właściwości mechanicznych mas metodami stosowanymi w reologii.

Opracowany model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich może znaleźć zastosowanie m.in. do:

- doboru parametrów konstrukcyjnych i warunków pracy głowic impulsowych maszyn formierskich,
- doboru parametrów procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich,
- optymalizacji głowic impulsowych maszyn formierskich oraz optymalizacji procesu impulsowego prasowania mas.

2. IMPULSOWE ZAGĘSZCZANIE MAS FORMIERSKICH

Schemat procesu impulsowego zamieszczono na rys. 2.1.



Rys.2.1. Schemat procesu impulsowego: głowica impulsowa (1), zbiornik akumulacyjny (2), skrzynka formierska (3), ZI – zawór impulsowy, V_a – objętość zbiornika akumulacyjnego, V_p – objętość przestrzeni technologicznej nad masą formierską, p_0 – ciśnienie początkowe procesu impulsowego, p_k – ciśnienie końcowe procesu impulsowego, p_c nacisk całkowity w masie formierskiej

Zasada zagęszczania impulsowego polega na gwałtownym, realizowanym w bardzo krótkim czasie (rzędu kilku lub kilkunastu ms), otwarciu zaworu impulsowego ZI [24-26] głowicy impulsowej, umieszczonej nad przestrzenią technologiczną, wewnątrz której znajduje się masa formierska. Spowodowany w ten sposób nagły wzrost ciśnienia w przestrzeni nad masą formierską (maksymalna wartość szybkości narastania ciśnienia może sięgnąć nawet 300 MPa/s) powoduje nadanie słupowi masy dużej prędkości przemieszczania się w kierunku płyty modelowej i, w efekcie, dużą szybkość deformacji masy, co powoduje wysoki stopień jej zagęszczenia.

Proces impulsowy można podzielić na następujące fazy:

FAZA 1 (przygotowanie głowicy impulsowej do pracy)

Polega na napełnieniu zbiornika akumulacyjnego głowicy impulsowej sprężonym powietrzem do zadanej wartości początkowej p_0 . W ten sposób głowica impulsowa zostaje przygotowana do pracy.

FAZA 2 (deformacja i zagęszczanie masy)

W tej fazie, w wyniku nagłego otwarcia zaworu impulsowego ZI, następuje gwałtowny wzrost ciśnienia w przestrzeni technologicznej nad masą formierską, umieszczoną w skrzynce formierskiej. Powoduje on osiągnięcie dużej szybkości deformacji i zagęszczania masy, i w efekcie, uzyskanie wysokiego stopnia zagęszczenia masy formierskiej.

FAZA 3 (zakończenie procesu zagęszczania masy) Zakończenie procesu zagęszczania następuje wtedy, gdy słup prasowanej masy osiągnie wysokość h_k .

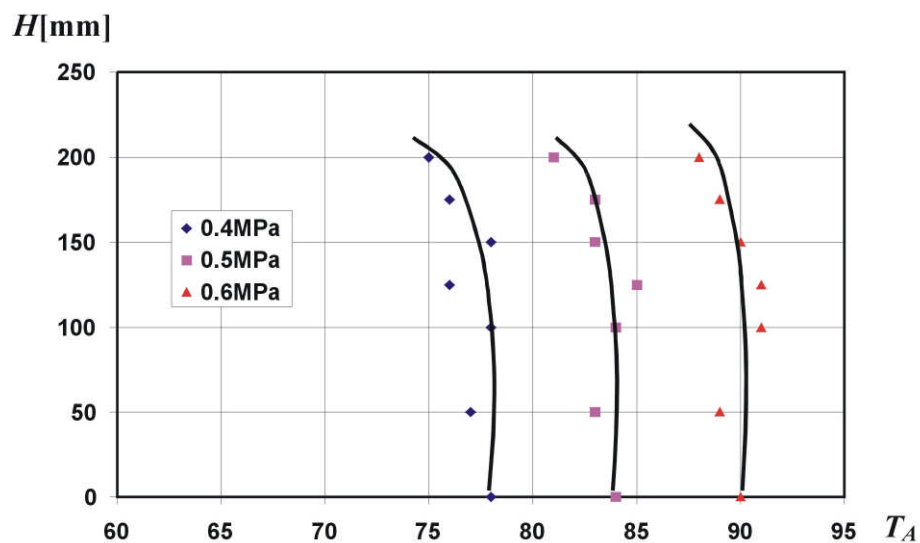
FAZA 4 (zakończenie procesu impulsowego)

W ostatniej fazie procesu impulsowego następuje zamknięcie zaworu ZI i odpowietrzenie przestrzeni technologicznej. Wówczas nacisk w masie formierskiej przyjmuje wartość p_U . Zależność między naciskami całkowitymi p_C , prasującym p_P oraz umocnieniem masy p_U określa wzór

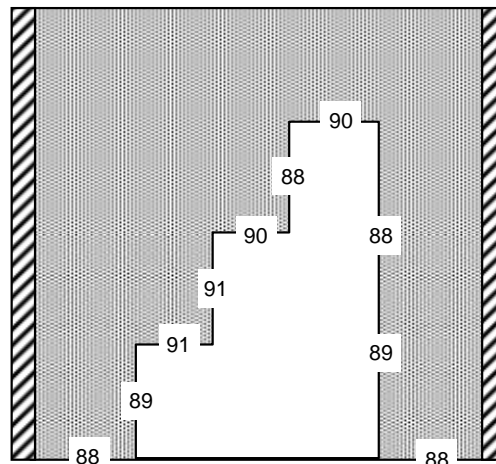
$$p_C = p_P + p_U \quad (2.1)$$

Do podstawowych zalet zagęszczania impulsowego, w aspekcie technologicznym, zalicza się:

- korzystny rozkład twardości powierzchniowej masy w funkcji wysokości formy (rys.2.2)[5],
- dużą jednorodność stopnia zagęszczenia w całej objętości formy, co potwierdza rozkład twardości powierzchniowej masy formierskiej w całej wnęce formy (rys.2.3)[5]



Rys 2.2. Rozkład twardości powierzchniowej T_A masy formierskiej wzdłuż wysokości formy [5]



Rys.2.3 Rozkład twardości powierzchniowej T_A masy formierskiej we wnętrzu formy [5]

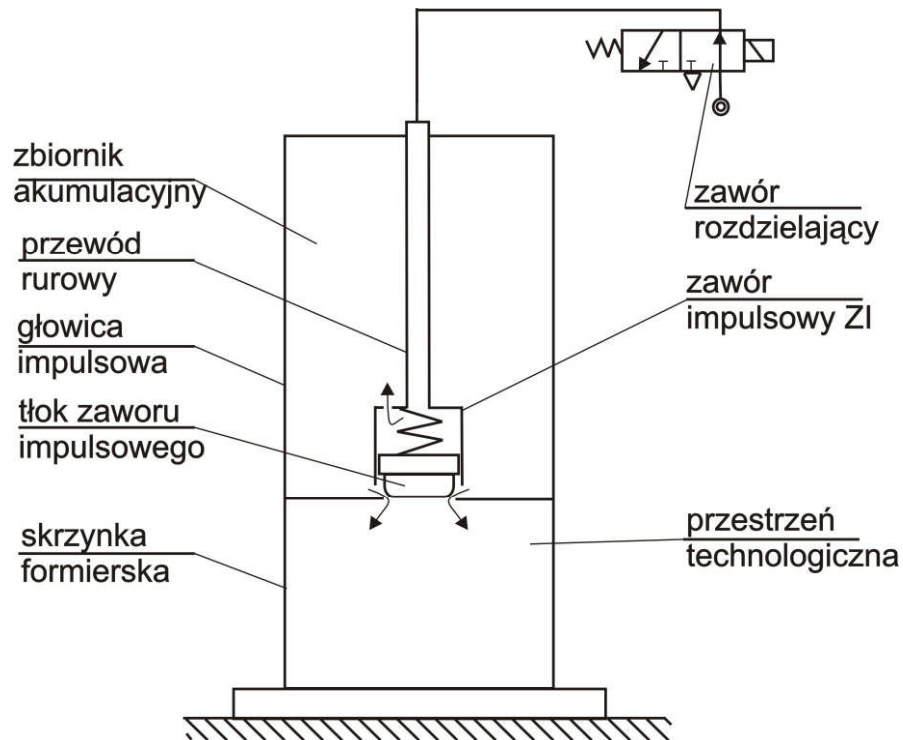
- małą chropowatość powierzchni form,
- małe wymagania w stosunku do oprzyrządowania odlewniczego – możliwość stosowania modeli o małych zależnościach.

Zagęszczanie impulsowe można zrealizować w różnych wariantach, do których należy zaliczyć:

- zagęszczanie jednostopniowe [10] [51] [56] [62]
- zagęszczanie dwustopniowe, realizowane podwójnym impulsem sprężonego powietrza [53],
- zagęszczanie ze sterowanym przebiegiem zmian ciśnienia w różnych częściach formy – np. proces VARIO-IMPULS [23][32][46][55],
- zagęszczanie z „elastycznie” sterowanym przebiegiem zagęszczania masy formierskiej – np. proces IMPACT MULTI SYSTEM [6][33][61].

2.1. Jednostopniowy proces impulsowy

Schemat procesu impulsowego, realizowanego za pomocą głowicy z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym, przedstawiono na rys. 2.4.



Rys.2.4. Schemat jedno-stopniowego procesu impulsowego

Prezentowana głowica impulsowa została opracowana w Laboratorium Podstaw Automatyk Instytutu Technologii Maszyn i Automatyk Politechniki Wrocławskiej. Składa się ona z następujących podzespołów:

- zbiornika akumulacyjnego sprężonego powietrza,
- zaworu impulsowego ZI,
- zaworu sterującego (rozdzielającego).

Głównym podzespołem głowicy impulsowej jest zawór impulsowy, który jest zbudowany z następujących elementów:

- cylindra,
- tłoka dwustopniowego,
- tłumika sprężynowego.

Cylinder zaworu ZI ma na swoim obwodzie otwory wylotowe, przez które następuje wylot sprężonego powietrza ze zbiornika akumulacyjnego do przestrzeni technologicznej. Cylinder ma ponadto otwory w dnie, przez które następuje napełnianie zbiornika akumulacyjnego głowicy impulsowej.

Dwustopniowy tłok zaworu ZI spełnia dwie funkcje:

- stanowi element zamykający króciec wylotowy głowicy,
- pozwala na gwałtowne otwarcie otworu wylotowego głowicy.

Przygotowanie do pracy głowicy impulsowej polega na doprowadzeniu sprężonego powietrza za źródła, poprzez zawór rozdzielający i przewód rurowy, do komory cylindra zaworu ZI, i dalej przez otwory w dnie cylindra do zbiornika akumulacyjnego. Osiągnięcie w zbiorniku akumulacyjnym zadanej wartości ciśnienia p_0 sprężonego powietrza oznacza stan gotowości głowicy do pracy.

W kolejnej fazie procesu impulsowego może zostać zainicjowana praca głowicy, która rozpoczyna się po przesterowaniu zaworu rozdzielającego. Zmiana jego położenia powoduje połączenie komory cylindra zaworu ZI z atmosferą. W następstwie tego następuje gwałtowny spadek ciśnienia w przewodzie rurowym i komórce cylindra zaworu ZI, co powoduje, że na tłok zaworu zaczyna oddziaływać siła $F=p_0(S_B-S_A)$, gdzie: S_A i S_B – powierzchnie stopni tłoka. W wyniku oddziaływania siły F tłok zaczyna się przemieszczać w górę komory cylindra zaworu ZI. Minimalne odejście tłoka z pozycji wyjściowej powoduje zmianę wartości siły oddziaływującej na tłok. W tym momencie wartość siły oddziaływującej na tłok jest równa $F=p_0S_B$, co oznacza gwałtowny przyrost wartości siły na tłoku. W efekcie prowadzi to do bardzo dużego przyspieszenia tłoka i niemal natychmiastowego otwarcia wylotu zbiornika akumulacyjnego głowicy impulsowej. Jeśli przepływ sprężonego powietrza z głowicy impulsowej jest skierowany do zamkniętej przestrzeni technologicznej z masą formierską, to następuje jej deformacja i zagęszczanie.

Trzecia faza procesu impulsowego – zakończenie zagęszczania masy formierskiej – ustaje wówczas gdy słup zagęszczanej masy przestaje zmieniać swoją wysokość i nastąpi wyrównanie ciśnień sprężonego powietrza w zbiorniku akumulacyjnym i przestrzeni technologicznej.

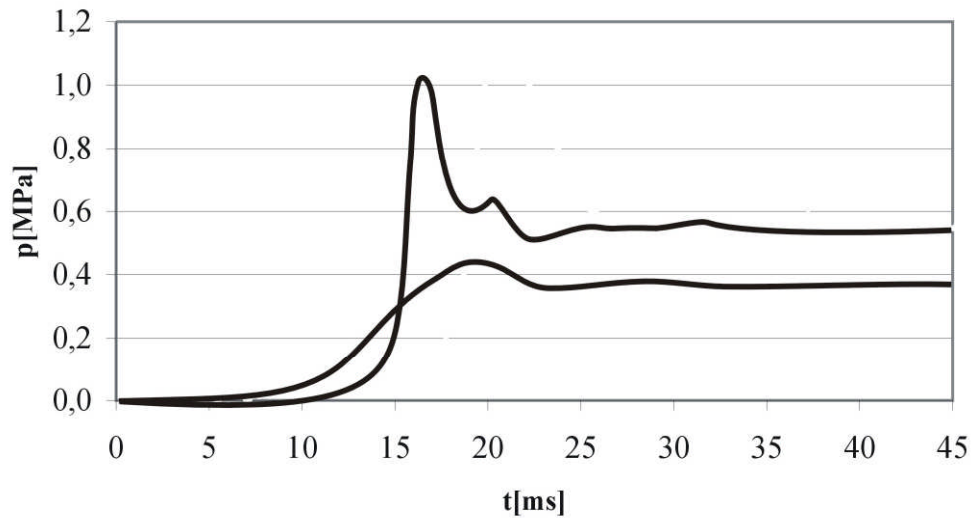
W ostatniej, czwartej fazie procesu impulsowego następuje samoczynne zamknięcie zaworu impulsowego (co powoduje ustanie sygnału (impulsu) sterującego zawór rozdzielający) oraz odpowietrzenie przestrzeni technologicznej.

Na rysunku 2.5 zamieszczono przebiegi zmian ciśnienia w przestrzeni nad masą formierską oraz nacisków p_C w masie formierskiej.

Na podstawie analizy prezentowanych zależności można stwierdzić, że przebieg zmian nacisków w zagęszczanej masie formierskiej jest następstwem ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni nad masą formierską.

Osiąganie większych wartości nacisków, w krótszym czasie, w warstwach masy położonych przy płycie modelowej, niż wartości ciśnienia sprężonego powietrza

w przestrzeni nad masą formierską wynika z charakteru zależności zmian sprężonego powietrza w funkcji czasu.

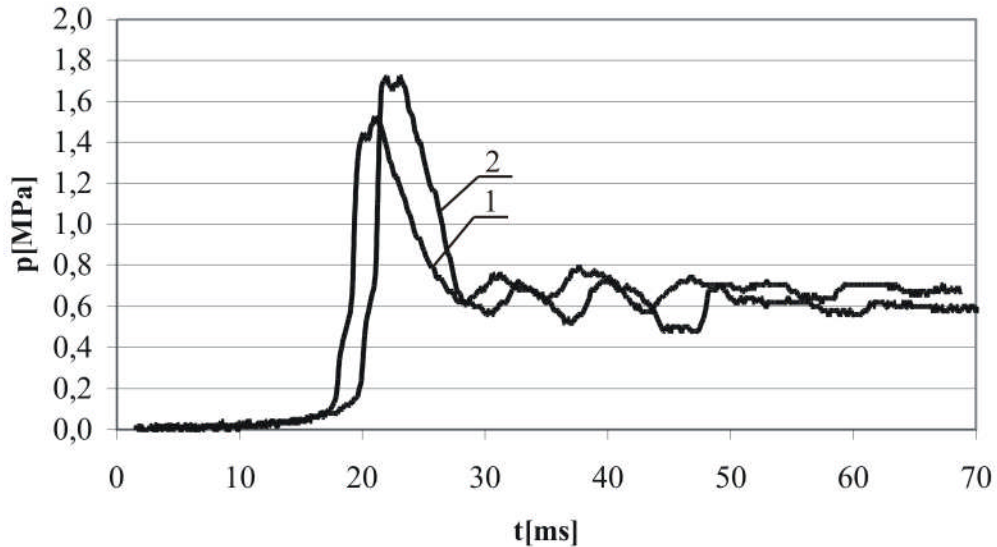


Rys.2.5. Przebiegi zmian ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni nad masą formierską i zmian nacisków w masie formierskiej w funkcji czasu [5]

W początkowym okresie następuje bardzo szybki wzrost prędkości narastania ciśnienia w przestrzeni nad masą, co powoduje nadanie słupowi zagęszczanej masy dużej prędkości przemieszczania się w kierunku płyty podmodelowej. W następnej fazie deformacji i zagęszczania masy prędkość narastania ciśnienia nad masą maleje. W efekcie powoduje to zmianę kierunku sił inercji słupa zagęszczanej masy formierskiej.

W pierwszym okresie przeciwdziałały one deformacji masy, natomiast w drugim ich kierunek działania sprzyjał jej odkształceniu i zagęszczaniu. Zatem o wartości sił inercji zagęszczanego słupa masy decyduje charakter zależności zmian ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni nad masą, czyli dynamika wewnętrzna głowicy impulsowej.

O efektywności przebiegu procesu impulsowego decydują także odkształcalność i tarcie wewnętrzne zagęszczanej masy formierskiej, czyli jej własności reologiczne, które mogą sprzyjać lub przeciwdziałać procesowi deformacji i zagęszczania masy. Wpływ, np. składu masy, na proces impulsowego zagęszczania zilustrowano na rys. 2.6. Wynika z niego że skład masy formierskiej ma znaczny wpływ na jej własności mechaniczne i reologiczne, stąd i na impulsowe jej zagęszczanie[36].



Rys.2.6. Zależności zmian nacisków w masie formierskiej podczas impulsowego zagęszczania: masa o zawartości 6% bentonitu „Specjal” i wilgotności 2,24% (1), masa 6% bentonitu „Geco” i wilgotności 2,80% (2)

Reasumując, należy stwierdzić że o przebiegu procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich decydują:

- dynamika głowicy impulsowej[2],
- własności reologiczne masy formierskiej[39].

2.2. Dwustopniowy proces impulsowy

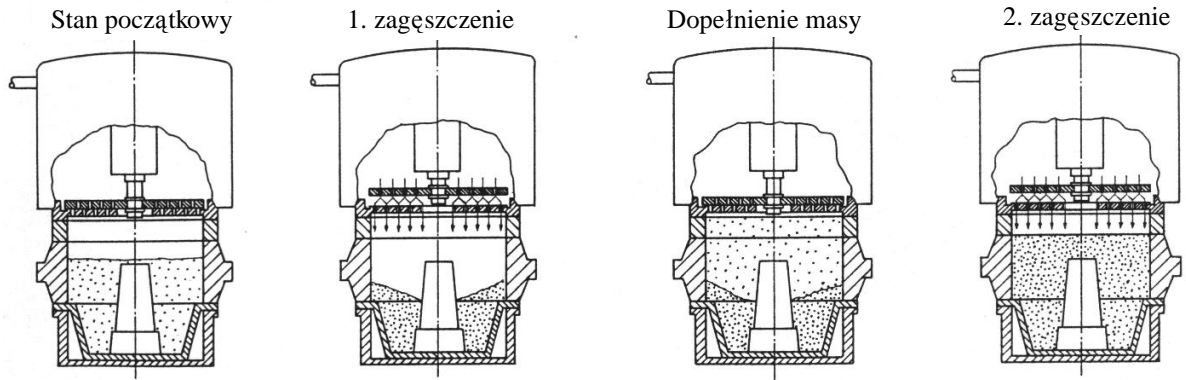
Dwustopniowy proces impulsowy polega na zagęszczaniu masy formierskiej podwójnym impulsem sprężonego powietrza.

W procesie zagęszczania podwójnym impulsem sprężonego powietrza, np. w rozwiązaniu firmy BMD [53], stosuje się standardową maszynę impulsową (rys. 2.7), za pomocą której proces wykonywania formy jest realizowany w dwóch etapach.

W pierwszym etapie dozuje się i zagęszcza jedynie część masy formierskiej. W drugim etapie następuje dopełnieni masy formierskiej i jej powtórne zagęszczenie impulsem sprężonego powietrza.

Przedstawiony wariant procesu impulsowego jest zalecany w przypadku stosowania wysokich modeli.

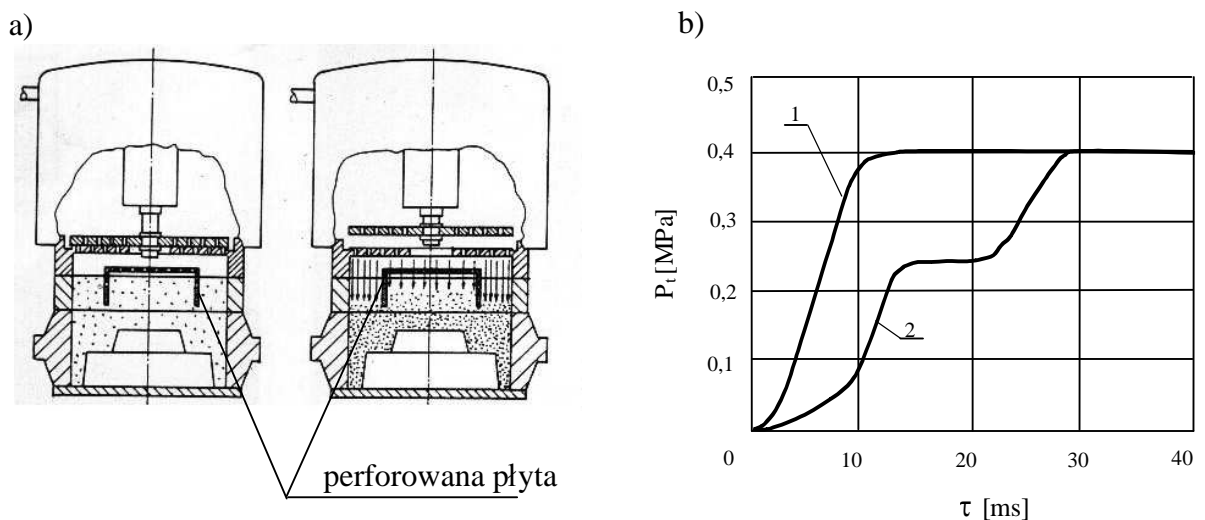
Można stwierdzić, że różnice procesów: jednostopniowego i dwustopniowego dotyczą sposobu realizacji zagęszczania a nie jego mechanizm.



Rys.2.7. Schemat procesu impulsowego zagęszczania impulsem sprężonego powietrza [53]

2.3. Proces impulsowy ze sterowanym przebiegiem zmian ciśnienia

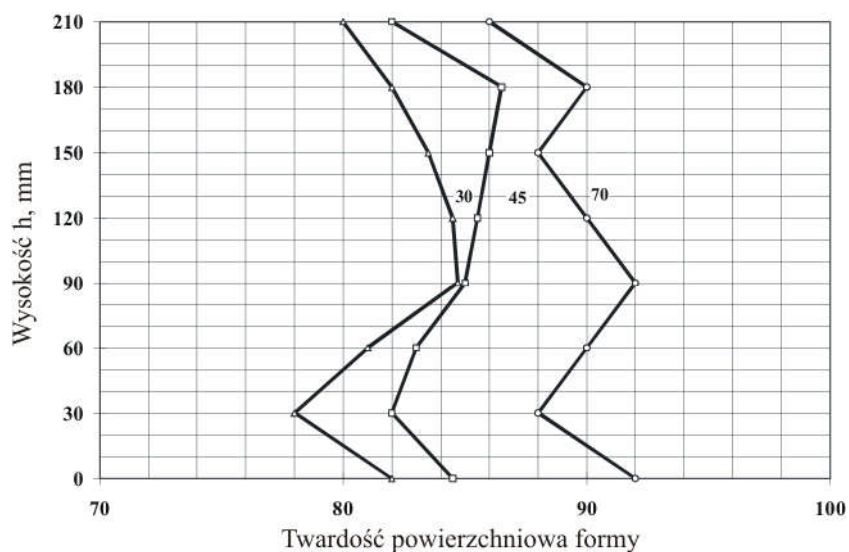
Rozwiązanie odmiany procesu impulsowego, umożliwiającej sterowanie przepływem sprężonego powietrza nad zagęszczaną masą formierską, pokazano na rys. 2.8. W prezentowanym wariantcie procesu impulsowego pomiędzy zawór impulsowy a powierzchnię swobodną masy formierskiej została wprowadzona perforowana płyta o wymiarach mniejszych od wymiarów gabarytowych skrzynki formierskiej.



Rys.2.8. Schemat głowicy impulsowej Vario-Impuls [57] (a) oraz przebiegi czasowe zmian ciśnienia powietrza w rejonach zewnętrznych skrzynki formierskiej (1) oraz wewnętrznych (pod perforowaną płytą (2) podczas realizacji procesu impulsowego (b))

W przyjętym rozwiązaniu procesu impulsowego istnieją zróżnicowane warunki zagęszczania masy formierskiej w różnych objętościach formy. Tym samym takie

rozwiązanie pozwala na aktywne sterowanie rozkładem stopnia zagęszczenia masy formierskiej w formie. Zmian stopnia perforacji płyty umożliwia uzależnienie efektywności zagęszczania od kształtu modelu (rys.2.9).



Rys.2.9. Twardości powierzchniowe masy formierskiej wzdłuż wysokości wnętrza formy w funkcji odległości od ściany skrzynki uzyskiwane w wyniku realizacji procesu Vario-Impuls [11]

W procesie impulsowym ze sterowanym przebiegiem zmian ciśnienia sprężonego powietrza mechanizm zagęszczania masy formierskiej jest taki sam jak w klasycznym, jednostopniowym procesie impulsowym.

2.4. Proces impulsowy z „elastycznym” sterowaniem procesu zagęszczania

Proces impulsowy z „elastycznym” sterowaniem zagęszczania masy formierskiej polega na kształtowaniu charakteru zmian strumienia sprężonego powietrza w przestrzeni nad masą formierską.

W rozwiązaniu wariantu procesu impulsowego Impact Multi-System [6] firmy GF DISA (rys.2.10.) zastosowano 2 zawory impulsowe o zróżnicowanej powierzchni i dynamice działania. Dzięki temu uzyskano możliwość sterowania zmianami ciśnienia i energii impulsu sprężonego powietrza. Dzięki temu istnieje możliwość sterowania efektywnością zagęszczania masy formierskiej w krytycznych rejonach formy.

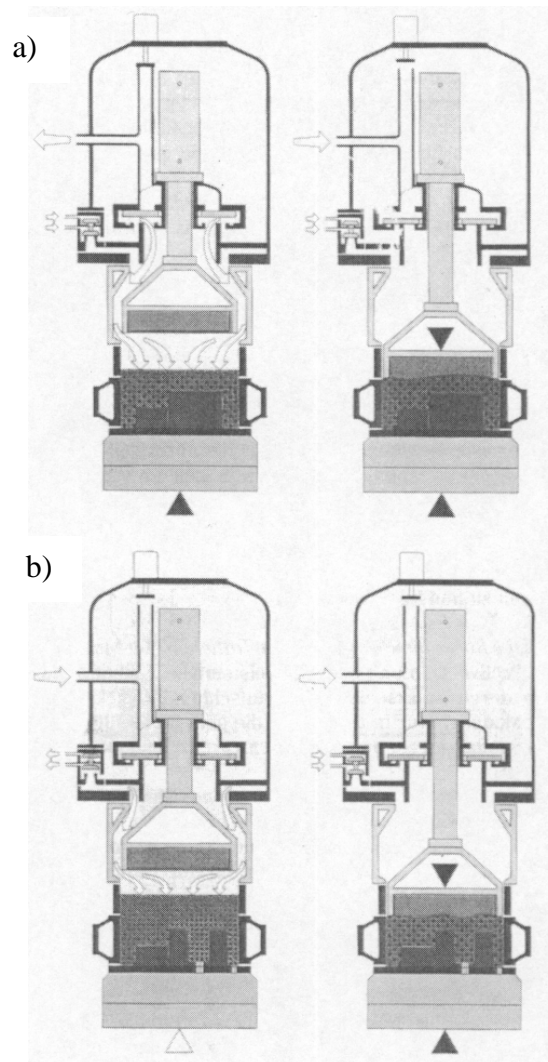
Główną zaletą omawianego systemu jest stworzenie „elastycznego” sterowania procesem zagęszczania masy formierskiej, niezależnie od stopnia skomplikowania

modeli, co uzyskuje się przez dobór odpowiedniego wariantu procesu i jego parametrów.

Również wariant Impact Multi-System został oparty na klasycznym impulsowym zagęszczaniu masy formierskiej. Różnica dotyczy jedynie wspomagania tego procesu przez doprasowanie statyczne górnych warstw masy formierskiej, przy czym nie ma ono wpływu na mechanizm i efektywność zagęszczania zasadniczej części formy, w szczególności nie dotyczy wnęki formy odwzorowującej zestaw modelowy.

Na podstawie analizy procesu impulsowego przedstawionego w rozdziałach 2.1–2.4 można stwierdzić, że do jego zamodelowania matematycznego konieczne jest łączne sformułowanie opisów dynamiki:

- głowicy impulsowej, użytej do realizacji impulsowego zagęszczania,
- procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej.



Rys.2.10. Schemat głowicy impulsowej - Impact Multi-System [61] realizującej proces impulsowy z doprowadzeniem (a) oraz strumieniowo - impulsowy z doprasowaniem (b)

3. MODELE MATEMATYCZNE PROCESU IMPULSOWEGO ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH

Proces impulsowego zagęszczania mas formierskich można rozpatrywać w dwóch aspektach, związanych z fizycznym przebiegiem procesu:

- pierwszy dotyczy opisu dynamiki czynnika zagęszczającego masę formierską. W procesie impulsowego zagęszczania dotyczy opisu przepływu strumienia sprężonego powietrza, zagęszczającego masę formierską, z głowicy do przestrzeni technologicznej.
- drugi dotyczy procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej.

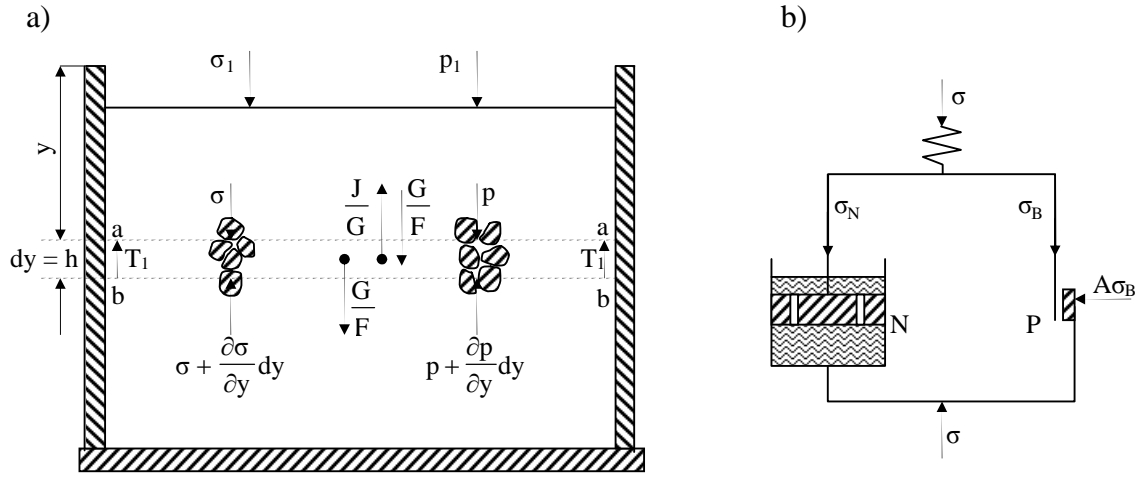
W związku z powyższym można stwierdzić, że modelowanie procesu impulsowego zagęszczania masy formierskiej wymaga równoczesnego opisu dynamiki głowicy maszyny formierskiej oraz procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej. Określenie ścisłych związków między podstawowymi parametrami maszyny formierskiej a efektami zagęszczania jest zagadnieniem bardzo złożonym, a to z uwagi na dużą dynamikę realizowanych procesów fizycznych (np. przepływ powietrza, proces zagęszczania masy), zróżnicowane właściwości masy formierskiej oraz różnorodność rozwiązań maszyn.

Wymienione tutaj trudności spowodowały, że dotychczas nie opracowano modelu matematycznego pozwalającego na uzyskiwanie wyników badań symulacyjnych dobrze opisujących, w sposób jakościowy i ilościowy, parametry procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

Poniżej opisano wybrane próby modelowania matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

3.1. Model G.M. Orlova

Schemat procesu zagęszczania impulsowego masy formierskiej wg G.M. Orlova [49] przedstawiono na rys. 3.1. Model matematyczny G.M. Orlova procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich zawiera opis stanu naprężeń w elementarnej warstwie masy dy dynamicznie zagęszczanej.



Rys. 3.1. Model procesu zagęszczenia impulsowego wg G.M. Orlova [49]: (a) - układ sił działających w elementarnej warstwie masy, (b) – reologiczny model masy

Według autora, na elementarną warstwę masy o grubości dy działają następujące naprężenia:

- σ od warstw leżących wyżej,
- ciśnienia p sprężonego powietrza, znajdującego się w porach masy,
- wywołane siłami:
 - tarcia T masy o ścianki skrzynki formierskiej,
 - bezwładności I warstwy masy,
 - ciężkości G warstwy masy,
 - filtracji Q powietrza w masie.

Dynamikę procesu impulsowego zagęszczenia mas formierskich G.M. Orlov opisuje następującym układem równań:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = -(1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + p \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \xi \cdot \varphi \cdot \frac{U_o}{F} \cdot \sigma - (a - g) \cdot \rho_c + \frac{U}{k} \quad (3.1)$$

$$\rho_c = \rho_o \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^\mu \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{\sigma}{\sigma_o} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_H} \right)^A - 1 \right] \cdot \exp \left(- \frac{A \cdot \sigma \cdot \tau}{\lambda} \right) \right\}^{-\mu} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = p \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{U}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right) \quad (3.3)$$

$$p_1 = n \cdot \tau^b \cdot e^{c \cdot \tau} + p_o \quad (3.4)$$

$$U = k_a \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_a \quad (3.5)$$

w którym:

- a – przyspieszenie warstwy masy, zmienne wzdłuż wysokości,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- k – współczynnik filtracji,
- k_a – współczynnik filtracji w przekroju a-a.
- n, b, c – współczynniki,
- p – ciśnienie sprężonego powietrza ,
- p_o – ciśnienie atmosferyczne,
- p_l – ciśnienie w przestrzeni nad masą,
- A – współczynnik,
- U – prędkość powietrza,
- U_o i F - obwód i powierzchnia skrzynki,
- ε – porowatość masy,
- $\mu = 1/A$,
- ξ i φ – współczynnik bocznego ciśnienia i powierzchniowego tarcia,
- λ – współczynnik dynamicznej lepkości masy,
- ρ_c – gęstość masy formierskiej,
- ρ_H – gęstość masy przed przyłożeniem (lub zmianą) naprężeń,
- ρ_o – znana gęstość masy przy naprężeniu σ_o ($\sigma_o=0,1\text{MPa}$ lub $\sigma_o=10\text{MPa}$),
- τ – czas od początku procesu,

Poszczególne równania (3.1)-(3.5) opisują:

- równanie (3.1) – zmiany naprężeń w elementarnej warstwie masy dy ,
- równanie (3.2) – w sposób uproszczony, związek deformacji masy z naprężeniami ściskającymi, wyprowadzony w oparciu o model reologiczny masy formierskiej, przedstawiony na rys. 3.1b. W równaniu (3.2) G.M. Orlov pominął własności sprężyste masy formierskiej,
- równanie (3.3) – zmiany ciśnienia sprężonego powietrza zawartego w masie formierskiej,
- równanie (3.4) – wymuszenie powodujące deformację i zagęszczanie masy formierskiej. W przedstawionym przypadku dotyczy to narostu ciśnienia w przestrzeni nad masą podczas impulsowego zagęszczania. W ogólnym przypadku podczas opisu procesu prasowania wymagana jest

znajomość dynamiki głowicy prasującej, z której można wyznaczyć dynamikę czynnika zagęszczającego,

- równanie (3.5) – w sposób uproszczony, w wyniku założenia laminarnego przepływu powietrza, prędkość powietrza w elementarnej warstwie masy.

Badania symulacyjne modelu G.M. Orlova wymagają znajomości następujących wielkości:

- porowatości masy ε , którą określa wzór

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_k} \quad (3.6)$$

w którym: $\rho_k = 2650 \text{ kg/m}^3$ – gęstość (masa właściwa) szkieletu masy (piasku kwarcowego),

- współczynnika filtracji k , który określa wzór

$$k = k_I \cdot \left(\frac{\rho_I}{\rho_c} \right)^{b_I} \quad (3.7)$$

w którym:

k_I – współczynnik filtracji masy przy ustalonej gęstości ρ_I ,

b_I – współczynnik empiryczny,

$k_I = P^W/60 \text{ [m}^2\text{/(MPa}\cdot\text{s)]}$,

P^W – przepuszczalność masy, określona standardową metodą przy ρ_I .

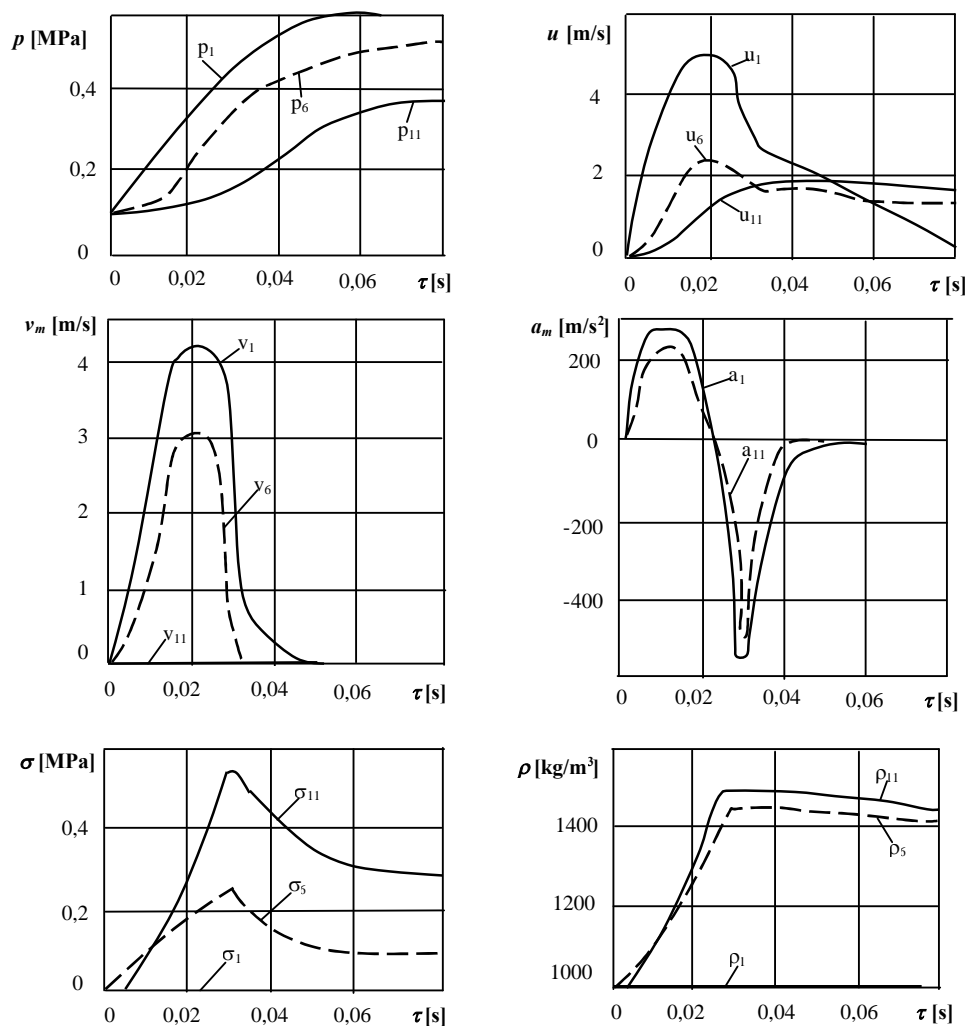
- wartości współczynników ξ , φ , A , n , b , c , λ , k_a , b_I , których sposób lub metody określania nie zostały podane przez G.M. Orlova.

Wyniki badań symulacyjnych modelu matematycznego G.M. Orlova procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, zostały przedstawione w pracy [48].

Podczas badań symulacyjnych G.M. Orlov przyjął następujące dane wejściowe:

$n=0,71 \cdot 10^8$, $b=1,33$, $c=-20$, graniczna gęstość masy (przy $\sigma_o=10\text{MPa}$) wynosi $\sigma_o=1700\text{kg/m}^3$, współczynnik zagęszczalności $\mu=0,04$, współczynnik dynamicznej lepkości $\lambda=1 \cdot 10^4\text{Pa}\cdot\text{s}$, naważka masy 68kg, wysokość słupa nie zagęszczonej masy 0,34m, powierzchnia skrzynki $0,2\text{m}^2$, względna powierzchnia wentylacji 0,01.

Na rysunku 3.2 zamieszczono wyniki badań symulacyjnych modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, które przedstawiają przebiegi zmian podstawowych wielkości fizycznych w procesie zagęszczania form.

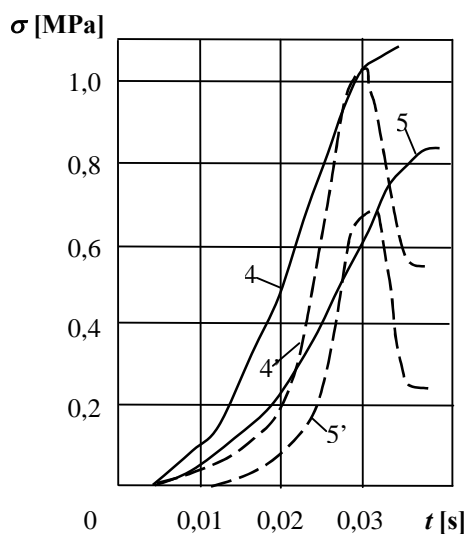


Rys. 3.2. Wyniki badań symulacyjnych modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich wg G.M. Orlova [48]; p - ciśnienie powietrza, u - względna prędkość powietrza przepływającego przez masę formierską, v_m - prędkość przemieszczania warstw masy, a_m - przyspieszenie warstw masy, σ - naprężenie w elementarnej warstwie masy, ρ - gęstość masy, indeksy 1,6,11 - oznaczają wymienione wielkości na poziomie górnej powierzchni słupa masy (1), w środku słupa masy (6) oraz w rejonie płyty modelowej (11)

Na rysunku 3.2 indeksy 1, 6 i 11 oznaczają numery warstw i dotyczą parametrów granic warstw usytuowanych w nie zagęszczonej masie w odległości od początku układu współrzędnych $y_1=0$ (górna powierzchnia słupa masy), $y_6=0,17$ m (w środku słupa masy) i $y_{11}=0,34$ m (przy płycie modelowej). Przy ruchu sprężonego powietrza z góry na dół jego ciśnienie na górnej granicy dowolnej warstwy jest większe niż na dolnej i dlatego powstają w niej naprężenia ściskające, które sumują się w miarę oddalania od góry formy.

Próbie eksperymentalnej weryfikacji uzyskanych wyników badań symulacyjnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich G.M. Orlov podjął znacznie później, gdyż przykładowe wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych opublikował w 1992 roku [47].

Wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich zamieszczono na rys. 3.3. Przedstawia on wyniki pomiarów nacisków w masie formierskiej w pobliżu płyty modelowej (przebiegi 5 i 5') oraz w środku formy (przebiegi 4 i 4').



Rys. 3.3. Porównanie wyników badań eksperymentalnych (oznaczone linią ciągłą) i symulacyjnych (oznaczone linią przerywaną) pomiarów nacisków w masie formierskiej w pobliżu płyty modelowej (przebiegi 5 i 5') oraz w środku formy (przebiegi 4 i 4') [47]

Analiza zaprezentowanych wyników pozwala na stwierdzenie, że model G.M. Orlova nie opisuje dokładnie procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. Znaczne różnice między uzyskanymi przez G.M. Orlova wynikami badań symulacyjnych modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania oraz weryfikującymi wynikami badań eksperymentalnych, wynikają między innymi z niemożności określenia wielu współczynników, występujących w układzie równań różniczkowych modelu G.M. Orlova.

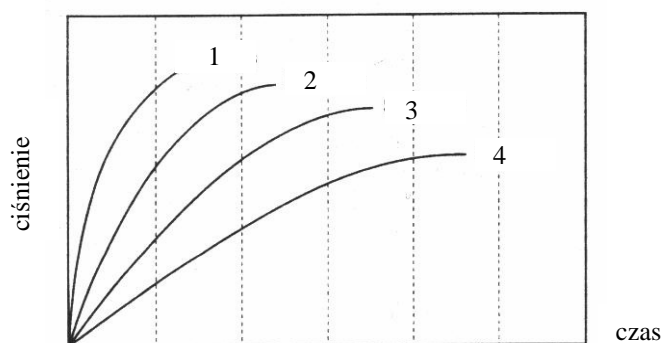
W związku z powyższym można stwierdzić, że uzyskane wyniki badań symulacyjnych (rys. 3.2) nie opisują poprawnie zmian nacisków powstających w masie formierskiej zagęszczanej impulsowo. Model G.M. Orlova opisuje w sposób przybliżony, pod względem jakościowym, jedynie procesy związane z dynamiką głowicy impulsowej (narastanie ciśnienia w przestrzeni nad masą formierską) oraz

parametry zagęszczanej masy formierskiej, bezpośrednio związane z działającym na nią wymuszeniem (prędkość, przyspieszenie i przemieszczenie górnych warstw masy).

Zaprezentowane na rysunku 3.3 wyniki badań eksperymentalnych procesu impulsowego również nie przedstawiają poprawnie zmian nacisków w masie formierskiej, ponieważ charakter zamieszczonych przebiegów znacznie odbiega od wyników badań eksperymentalnych, publikowanych przez innych autorów [22][53].

3.2. Model J. Basta

Model matematyczny opracowany przez J. Basta [4], dotyczy różnych metod impulsowego zagęszczania mas formierskich strumieniem sprężonego powietrza. Opracowanie to oparte jest na jednym schemacie modelu procesu zagęszczania, w którym, w zależności od zastosowanego zaworu impulsowego, otrzymuje się następujące metody zagęszczania: nadmuchiwanie, wstrzeliwanie, strumieniowe i impulsowe. O rodzaju metody decyduje dynamika działania zastosowanego zaworu (rys. 3.4), otwierającego otwór wylotowy zbiornika akumulacyjnego sprężonego powietrza.



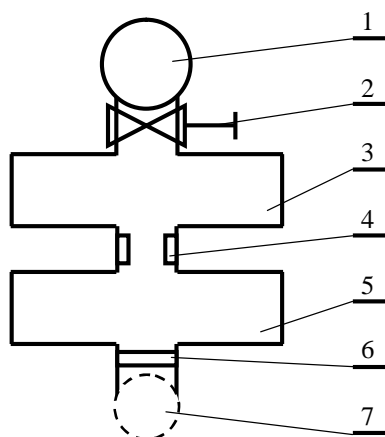
Rys. 3.4. Zależności szybkości narastania ciśnienia sprężonego powietrza w funkcji czasu w przestrzeni technologicznej uzyskane dla następujących wariantów zagęszczania strumieniem sprężonego powietrza: impulsowego (1), strumieniowego (2), wstrzeliwania (3) oraz nadmuchiwania (4) [4]

W zależności od sposobu działania powietrza na masę formierską pneumatyczne metody zagęszczania masy można podzielić na:

- ✓ zagęszczanie z transportem materiału formierskiego – nadmuchiwanie, wstrzeliwanie, stosowane głównie do wykonywania rdzeni odlewniczych,

- ✓ zagęszczanie bez transportu materiału formierskiego - strumieniowe i impulsowe, stosowane przede wszystkim podczas wykonywania form odlewniczych.

Ogólny schemat stanowiska do pneumatycznego zagęszczania mas formierskich przedstawiono na rys. 3.5. Składa się ono z następujących głównych elementów: zbiornika sprężonego powietrza lub magistrali ze sprężonym powietrzem (1), zaworu (2), zbiornika akumulacyjnego (3), zaworu strzałowego, dmuchowego lub impulsowego (4), skrzynki technologicznej (5), szczelin wylotowych (6). O dynamice maszyny formierskiej decyduje charakter przepływu sprężonego powietrza z przestrzeni zbiornika akumulacyjnego (3) do przestrzeni technologicznej (5), zależny od dynamiki zastosowanego zaworu (4).



Rys. 3.5. Ogólny schemat procesów pneumatycznego zagęszczania [4], zbiornik sprężonego powietrza (1), zawór (2), zbiornik akumulacyjny (3), zawór strzałowy, dmuchowy lub impulsowy (4), skrzynka formierska (5), szczeliny wylotowe (6), atmosfera (7)

Dynamikę maszyny formierskiej można opisać za pomocą równań różniczkowych opisujących przepływ sprężonego powietrza z przestrzeni zbiornika akumulacyjnego maszyny formierskiej do przestrzeni technologicznej. Stąd można wyznaczyć, jeden z głównych parametrów charakteryzujących dynamikę maszyny formierskiej, szybkość narastania ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej.

Podstawę do opisu dynamiki tego procesu stanowi bilans masowy sprężonego powietrza znajdującego się w przestrzeni technologicznej, którego ogólną postać, w formie równania różniczkowego, można przedstawić następująco

$$dm_L = \left(k_V \cdot A_V \cdot \Psi_V \cdot \sqrt{\frac{p_K}{v_K}} - k_A \cdot A_A \cdot \Psi_A \cdot \sqrt{\frac{p_B}{v_B}} \right) \cdot dt \quad (3.8)$$

Przyjmując, że przemiana gazowa wypływającego powietrza jest przemianą adiabatyczną otrzymujemy następujące uproszczenia:

$$p_B \cdot v_B^\kappa = const \quad (3.9)$$

$$m_{LK} = \frac{V_B}{v_K} \cdot \left(\frac{p_B}{p_K} \right)^{1/\kappa} \quad (3.10)$$

W efekcie uzyskuje się dwa warianty opisu szybkości narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej:

a) bez masy formierskiej

$$\frac{dp_B}{dt} = \frac{\kappa \cdot v_K}{V_B} \cdot p_K^{1/\kappa} \cdot p_B^{\kappa-1/\kappa} \cdot \left(k_V \cdot A_V \cdot \Psi_V \cdot \sqrt{\frac{p_K}{v_K}} - k_A \cdot A_A \cdot \Psi_A \cdot \sqrt{\frac{p_B}{v_B}} \right) \quad (3.11a)$$

b) z masą formierską – występuje zmiana objętości przestrzeni technologicznej

$$\frac{dp_B}{dt} = \frac{\kappa \cdot v_K}{V_B} \cdot p_K^{1/\kappa} \cdot p_B^{\kappa-1/\kappa} \cdot \left(k_V \cdot A_V \cdot \Psi_V \cdot \sqrt{\frac{p_K}{v_K}} - k_A \cdot A_A \cdot \Psi_A \cdot \sqrt{\frac{p_B}{v_B}} \right) - \frac{\kappa \cdot p_B}{V_B} \cdot \frac{dV_B}{dt} \quad (3.11b)$$

gdzie:

m_L – masa powietrza,

m_{LK} – masa powietrza w zbiorniku akumulacyjnym,

κ – wykładnik adiabaty,

p_K – ciśnienie powietrza w zbiorniku akumulacyjnym,

v_K – objętość właściwa sprężonego powietrza w zbiorniku akumulacyjnym,

V_B – objętość przestrzeni technologicznej,

k_V – współczynnik przepływu powietrza przez zawór,

A_V – pole przekroju poprzecznego powierzchni przepływu w zaworze,

Ψ_V – funkcja przepływu sprężonego powietrza przez zawór,

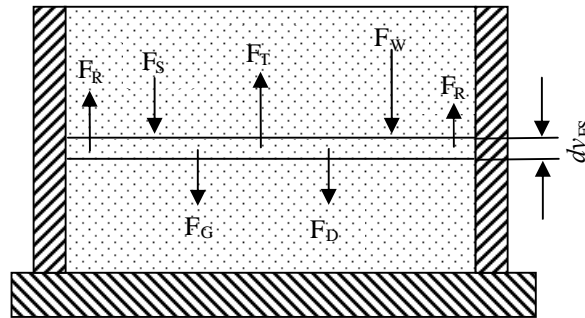
k_A – współczynnik przepływu powietrza przez otwór wylotowy,

A_A – pole przekroju poprzecznego powierzchni przepływu w otworze wylotowym,

Ψ_A – funkcja przepływu sprężonego powietrza przez otwór wylotowy.

Według J. Basta powyższe równania są słuszne dla wszystkich metod pneumatycznego zagęszczania, a o efektywności zagęszczania masy formierskiej decyduje szybkość narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej (rys.3.4).

Podstawę do opisu J. Basta procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej stanowi model opracowany przez G.M. Orlova, który opisuje stan naprężeń w elementarnej warstwie masy dy (rys. 3.6). Model ten jest obarczony takimi wadami jak model G.M. Orlova.



Rys. 3.6. Schemat układu sił działających na warstwę masy o grubości dy w trakcie jej zagęszczania [4]

J. Bast, budując model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich rozpatruje stan naprężeń działających na elementarną warstwę masy o grubości dy wynikający z działania na nią następujących sił:

- siły nacisku F_D wywieranego przez warstwy masy znajdujące się nad warstwą dy

$$F_D = \sigma \cdot A_{FK} \quad (3.12)$$

gdzie:

σ – naprężenie ściskające,

A_{FK} – pole przekroju powierzchni skrzynki formierskiej,

- siły bezwładności F_T elementarnej warstwy masy

$$F_T = a_{FS} \cdot m_{FS} \quad (3.13)$$

gdzie:

a_{FS} – przyspieszenie elementarnej warstwy masy formierskiej,

m_{FS} – masa naważki elementarnej warstwy masy formierskiej,

- siły ciężkości

$$F_G = g \cdot m_{FS} \quad (3.14)$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie,

- siły oporu przepływu F_W powietrza przez elementarną warstwę masy

$$F_W = (1 - \varepsilon_{FS}) \cdot p_B \cdot A_{FK} \quad (3.15)$$

gdzie:

ε_{FS} – porowatość masy,

- siły statycznego oddziaływania sprężonego powietrza F_S , zależnej od położenia elementarnej warstwy masy

$$F_S = \left(p_B + \frac{\partial p_B}{\partial y_{FS}} \cdot \frac{dy_{FS}}{2} \right) \cdot \left\{ \left[1 - \left(\varepsilon_{FS} - \frac{\partial \varepsilon_{FS}}{\partial y_{FS}} \right) \cdot dy_{FS} \right] \cdot A_{FS} - (1 - \varepsilon_{FS}) \cdot A_{FK} \right\} \quad (3.16)$$

gdzie:

y_{FS} – współrzędna położenia elementarnej warstwy masy formierskiej względem wysokości formy,

- siły tarcia elementarnej warstwy masy o ścianki boczne formy

$$F_R = \xi_{FS} \cdot \mu_{FK} \cdot U_{FK} \cdot \sigma \cdot dy_{FS} \quad (3.17)$$

gdzie:

ξ_{FS} – współczynnik bocznego ciśnienia,

μ_{FS} – współczynnik tarcia masy,

U_{FK} – obwód skrzynki formierskiej.

Korzystając z zasady D’Alamberta otrzymuje się równanie opisujące zmianę naprężeń działających na elementarną warstwę masy formierskiej

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y_{FS}} = -(1 - \varepsilon_{FS}) \cdot \frac{\partial p_B}{\partial y_{FS}} - (a_{FS} - g) \cdot \rho_{FS} - \frac{\xi_{FS} \cdot \mu_{FS} \cdot U_{FK}}{A_{FK}} \cdot \sigma \quad (3.18)$$

gdzie:

ρ_{FS} – gęstość masy formierskiej.

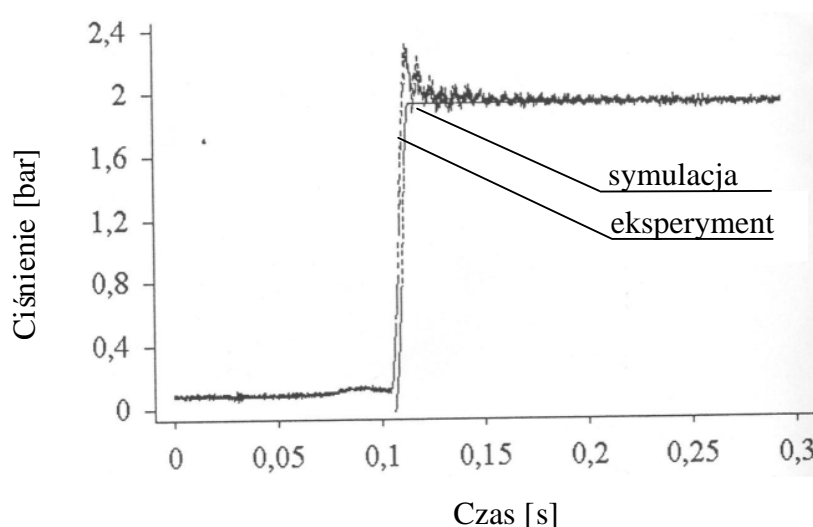
Układ równań (3.11) i (3.18) stanowi model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania masy formierskiej, realizowanego pneumatycznymi metodami zagęszczania. Z pomocą zaprezentowanego modelu można określać na

drodze symulacyjnej, optymalne parametry procesu impulsowego zagęszczania masy formierskiej.

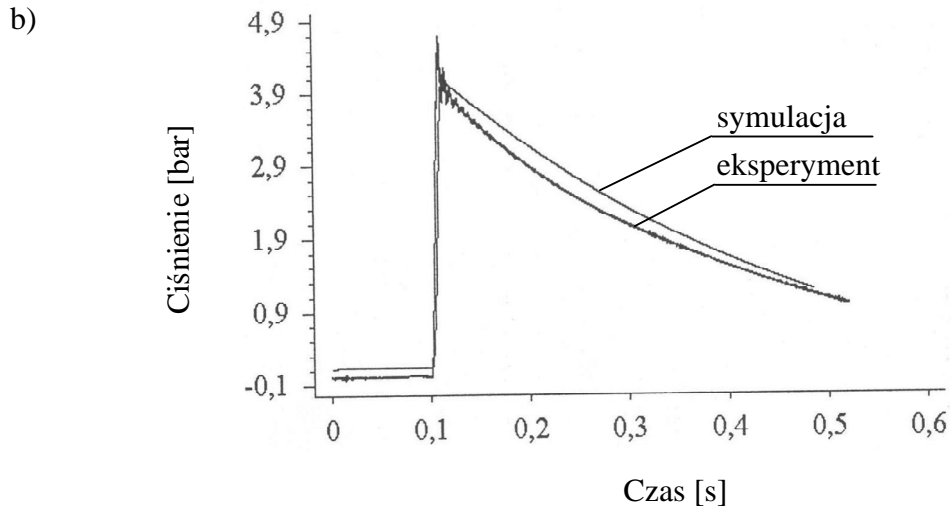
Przykładowe wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, zamieszczono na rys. 3.7 i 3.8 [59]. Prezentowane wyniki badań symulacyjnych uzyskano stosując wymuszenie opisane równaniem (3.11). Zmiany objętości V_B przestrzeni technologicznej, wynikające ze zmian wysokości słupa masy formierskiej, opisano zależnościami uzyskanymi na podstawie badań eksperymentalnych. Ze względu na trudności z wyznaczeniem parametrów, nie rozwiązywano równania (3.18) opisującego proces deformacji i zagęszczania masy formierskiej. W związku z powyższym w publikacji zamieszczono porównanie wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych dotyczących jedynie dynamiki głowicy realizującej proces impulsowego zagęszczania mas formierskich.

Na rysunku 3.7 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych przebiegu narostu ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej bez masy formierskiej dla następujących wariantów: bez odpowietrzania formy i ciśnieniu zasilania $p_0=0,35\text{MPa}$ (rys. 3.7a) oraz z odpowietrzaniem formy i $p_0=0,70\text{MPa}$ (rys. 3.7b). Natomiast na rysunku 3.8 zamieszczono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych przebiegów narastania ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej nad masą formierską, uzyskane z użyciem różnych wartości ciśnienia zasilania wynoszących odpowiednio $p_0=0,35\text{MPa}$ (rys. 3.8a) oraz $p_0=0,70\text{MPa}$ (rys. 3.8b).

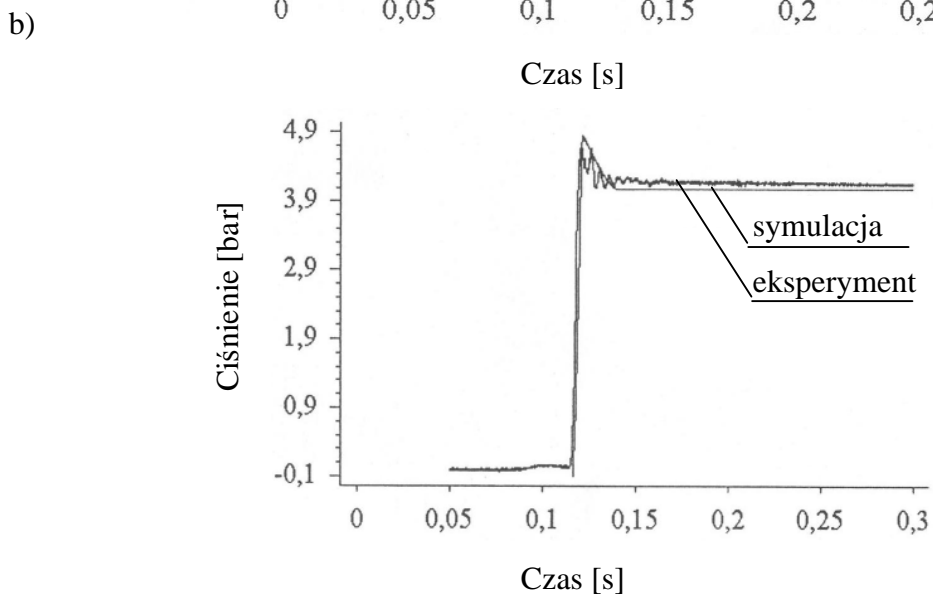
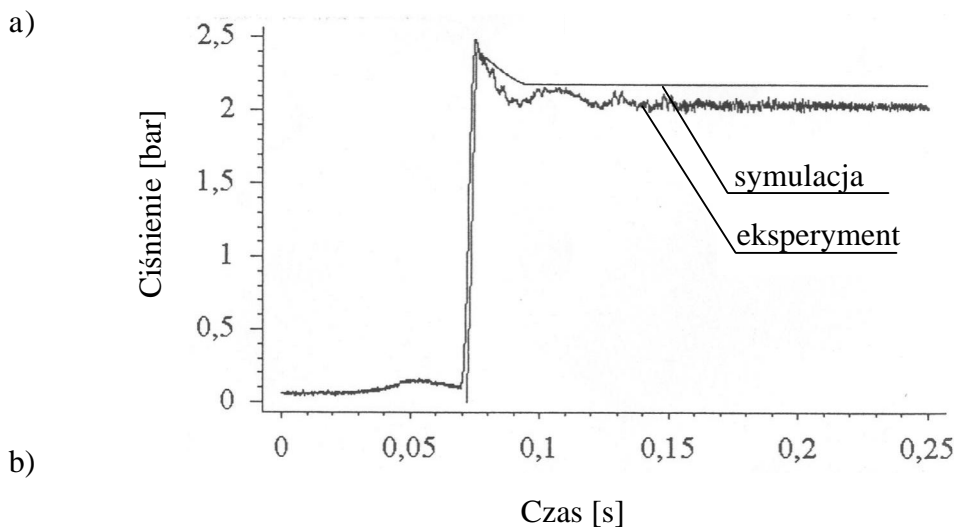
a)



Do rys. 3.7.



Rys. 3.7. Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych przebiegów narastania ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej bez masy formierskiej odpowiednio dla wariantu: bez odpowietrzania formy i $p_0=0,35\text{MPa}$ (a) oraz z odpowietrzaniem formy i $p_0=0,70\text{MPa}$ (b) wg [59]



Rys. 3.8. Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych przebiegów narastania ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej z masą formierską dla $p_0=0,35\text{MPa}$ (a) i $p_0=0,70\text{MPa}$ (b) wg [59]

Na podstawie analizy przedstawionych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich można stwierdzić, że równanie (3.11) poprawnie opisuje dynamikę głowicy impulsowej. Równanie to umożliwia, między innymi, określenie szybkości narastania ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej. Natomiast J. Bast nie prezentuje wyników badań symulacyjnych procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej, gdyż rozwiązanie równania (3.18) opisującego ten proces stwarza identyczne problemy jak rozwiązanie pierwowzoru, czyli równanie G.M. Orlova.

3.3. Model K. Smyksego

K. Smyksy zawęża opis matematyczny procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, do opisu dynamiki głowicy impulsowej z wykorzystaniem eksperymentalnego równania prasowania P.N. Aksonowa [56].

Rozpatrując przepływ sprężonego powietrza w przestrzeniach: głowicy impulsowej oraz pomiędzy głowicą, a przestrzenią technologiczną, można ten proces opisać układem równań różniczkowych. Układ ten opisuje zmiany ciśnienia i temperatury powietrza w analizowanej przestrzeni głowicy impulsowej lub też w przestrzeni technologicznej. Do opisu zmian objętości przestrzeni technologicznej, wynikających z procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej, zastosowano równanie P.N. Aksjonowa z poprawką W.S. Soltykowa uwzględniającą zmiany gęstości masy formierskiej ze wzrostem ciśnienia w przestrzeni nad masą.

Opracowując omawiany model matematyczny K. Smyksy przyjął następujące założenia upraszczające:

- Przepływ powietrza jest quasi ustalony. Takie założenie jest bardzo często stosowane do opisu dynamiki różnych elementów pneumatycznych [20].
- Zjawiska falowe są pomijane. Założenie to jest słuszne, ze względu na fakt, że ciśnienie robocze, w analizowanych przez niego maszynach impulsowych, nie przekracza 0,70MPa [57].

Dynamikę głowicy impulsowej opisano następującym układem równań różniczkowych:

$$\kappa \cdot R \cdot \left(\sum_{k=1}^n T_{i,k} \cdot dm_{i,k} - \sum_{l=1}^m T_{j,l} \cdot dm_{j,l} \right) = V_j \cdot dp_j + \kappa \cdot p_j \cdot dV_j \quad (3.19)$$

$$R \cdot \left[m_j \cdot dT_j + T_j \cdot \left(\sum_{k=1}^n dm_{i,k} - \sum_{i=1}^m dm_{j,l} \right) \right] = V_j \cdot dp_j + p_j \cdot dV_j \quad (3.20)$$

$$dm = G \cdot d\tau \quad (3.21)$$

$$\sum F = M \cdot \frac{d^2x}{d\tau^2} \quad (3.22)$$

w którym:

κ – wykładnik adiabaty,

R – stała gazowa powietrza,

p_j – ciśnienie sprężonego powietrza w analizowanej przestrzeni,

V_j – objętość analizowanej przestrzeni,

$T_{j,k}$ – temperatura powietrza dopływającego ze źródła k do przestrzeni j ,

T_j – temperatura w przestrzeni j ,

dm_i, dm_j – przyrosty masy powietrza w analizowanej przestrzeni związane z dopływem lub odpływem powietrza,

τ – czas,

$\sum F$ – wypadkowa sił działających na zawieradło, uwzględniająca opory ruchu,

M – masa elementów ruchomych,

x – przemieszczenie zawieradła,

G – masowy strumień powietrza.

W zaprezentowanym układzie równań, opisującym proces impulsowego zagęszczania mas formierskich, poszczególne zależności opisują:

- równania (3.19) i (3.20) - przemiany gazowe w analizowanej przestrzeni głowicy impulsowej lub też w przestrzeni technologicznej,
- równanie (3.21) - zmiany masy powietrza dm w analizowanej przestrzeni związane z dopływem lub odpływem sprężonego powietrza w czasie $d\tau$,
- równanie (3.22) - dynamikę elementów powodujących zmianę objętości analizowanej przestrzeni głowicy impulsowej oraz zmianę pola przekroju w zaworze impulsowym.

W celu rozwiązania przedstawionego układu równań niezbędne jest uwzględnienie zależności P.N. Aksjonowa z poprawką W.S. Sołtykowa, opisującej zmiany objętości przestrzeni technologicznej o postaci:

$$\rho_f = 1000 + c \cdot (k \cdot p_p)^{0,25} \quad (3.23)$$

przy uwzględnieniu związku:

$$H_f = H_o \cdot \frac{\rho_o}{\rho_f} \quad (3.24)$$

gdzie:

ρ_f – gęstość zagęszczanej masy formierskiej,

c – współczynnik zagęszczania ($c=22 \div 34$),

k – współczynnik poprawkowy uwzględniający szybkość wzrostu naprężeń ściskających,

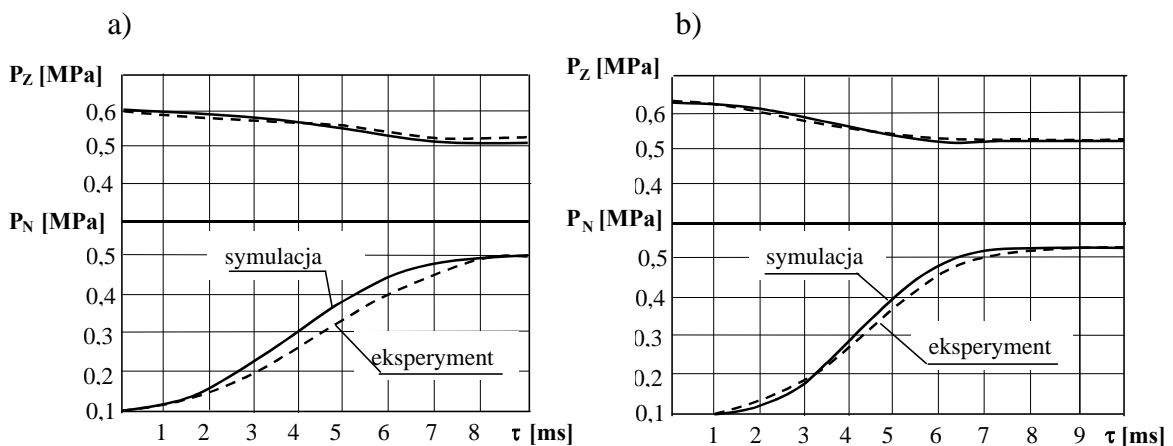
p_p – nacisk prasujący,

H_f – wysokość słupa zagęszczanej masy formierskiej,

H_o – wysokość początkowa słupa warstwy masy w skrzynce formierskiej,

ρ_o – gęstość początkowa masy formierskiej.

Przykładowe przebiegi czasowe ciśnienia sprężonego powietrza w głowicy impulsowej i przestrzeni technologicznej, uzyskane w wyniku przeprowadzenia badań symulacyjnych i eksperymentalnych, przedstawiono na rys. 3.9.



Rys. 3.9. Przebiegi czasowe ciśnień: w głowicy impulsowej oraz przestrzeni technologicznej, zarejestrowane podczas badań eksperymentalnych oraz uzyskane w wyniku symulacji cyfrowej pracy maszyny impulsowej dla $V_z/V_t=3,16$ (a) oraz $V_z/V_t=4,20$ (b), gdzie V_z – objętość zbiornika akumulacyjnego, V_t – objętość przestrzeni technologicznej [56]

Na podstawie analizy przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że model matematyczny zaproponowany przez K. Smyksego dobrze opisuje dynamikę głowicy maszyny impulsowej. Uzyskane w wyniku badań eksperymentalnych i symulacyjnych przebiegi ciśnienia w przestrzeni technologicznej wykazują dużą zbieżność, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym (rys.3.9). Jednak zaproponowany przez K. Smyksego model matematyczny nie opisuje procesu odkształcania i zagęszczania masy, zatem nie może być stosowany do projektowania i optymalizacji procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

3.4. Podsumowanie

Na podstawie analizy modeli matematycznych opisujących proces impulsowego zagęszczania mas formierskich można stwierdzić, że najpełniejszy opis procesu przedstawił G.M. Orlov. Model G.M. Orlova uwzględnia większość zjawisk fizycznych zachodzących w procesie impulsowego zagęszczania mas formierskich. Podstawowe równanie w modelu G.M. Orlova jest oparte na opisie stanu naprężeń w impulsowo zagęszczanej, elementarnej warstwie masy dy . Jednak model G.M. Orlova zawiera szereg uproszczeń oraz stosuje się w równaniach wielkości, które są trudne bądź niemożliwe do określenia, nawet na drodze empirycznej. W większości przypadków metody określania poszczególnych parametrów nie zostały podane. W związku z tym zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych nie opisują poprawnie, ani w sensie ilościowym ani też jakościowym, procesu odkształcania i deformacji masy. Model G.M. Orlova opisuje w sposób przybliżony, pod względem jakościowym, jedynie procesy związane z dynamiką głowicy impulsowej. W związku z powyższym zastosowanie modelu G.M. Orlova do praktycznych obliczeń projektowych i optymalizacyjnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich powoduje uzyskanie niedokładnych wyników badań symulacyjnych, które nie pozwalają na dobór optymalnych parametrów procesu.

Model J. Basta procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, stanowią: równanie opisujące dynamikę głowicy formierskiej oraz równanie, będące modyfikacją równania G.M. Orlova, opisujące proces odkształcania i zagęszczania masy formierskiej. Jednakże praktyczne zastosowanie może mieć jedynie równanie dotyczące opisu dynamiki głowicy, ponieważ równanie dotyczące opisu zagęszczania masy stwarza problemy w badaniach symulacyjnych, podobnie jak w modelu G.M. Orlova.

Zatem model J. Basta może być zastosowany do badania i określania jedynie dynamiki głowic maszyn formierskich.

Model matematyczny K. Smyksego, procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, ogranicza się do opisu dynamiki głowicy impulsowej. W związku z tym model ten nie opisuje procesu odkształcania i zagęszczania mas formierskich. Zastosowane równanie P.N. Aksjonowa z poprawką W.S. Soltykowa, umożliwia jedynie w sposób przybliżony opis zmian objętości w przestrzeni technologicznej nad zagęszczaną masą formierską. Zatem model K. Smyksego, podobnie jak J. Basta, można zastosować wyłącznie do badania dynamiki głowic impulsowych.

Ze względu na to, że dotychczasowe opisy matematyczne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich nie umożliwiają uzyskania kompleksowych wyników badań impulsowego zagęszczania, nie mogą być zastosowane w praktyce do projektowania i optymalizacji impulsowych głowic maszyn formierskich oraz procesu impulsowego zagęszczania. Wobec tego autor rozprawy, ze względu na konieczność znajomości opisu matematycznego i wyników badań symulacyjnych, podjął próbę opracowania modelu matematycznego w pełni opisującego proces impulsowego zagęszczania mas formierskich. Model ten musi zawierać opis matematyczny dynamiki głowicy prasującej oraz opis procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej[27][38].

4. TEZA I CELE PRACY

Na podstawie analizy procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich oraz sposobów jego realizacji i istniejących modeli matematycznych tego procesu sformułowano następującą tezę pracy doktorskiej:

TEZA

Model matematyczny impulsowego procesu zagęszczania mas formierskich stanowi układ równań różniczkowych opisujących:

- dynamikę głowicy impulsowej oraz
- lepko-sprężysty model reologiczny masy formierskiej.

Udowodnienie postawionej tezy wymagało zrealizowania następujących celów szczegółowych pracy:

1. Opracowania modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, w tym:
 - opracowania modelu matematyczny dynamiki głowicy prasującej,
 - udowodnienia, że do zamodelowania procesu odkształcania masy formierskiej można zastosować lepko-sprężysty model reologiczny.
2. Zrealizowania badań dynamiki głowicy impulsowej obejmujących:
 - badania symulacyjne,
 - badania eksperymentalne.
3. Zrealizowania badań procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich obejmujących:
 - badania symulacyjne,
 - badania eksperymentalne.
4. Dokonania analizy wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych:
 - dynamiki głowicy prasującej,
 - procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

Uwzględniając przedstawione cele szczegółowe pracy można stwierdzić, że zasadniczym celem pracy było opracowanie modelu matematycznego w pełni opisującego proces dynamicznego prasowania mas formierskich.

Cel pracy zrealizowano w dwóch etapach.

W pierwszym etapie opracowano model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich oraz zrealizowano badania symulacyjne zaproponowanego modelu.

W drugim etapie dokonano eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanego modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, na opracowanym i wykonanym stanowisku badawczym wyposażonym w głowicę impulsową z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym

5. MODELOWANIE PROCESU IMPULSOWEGO ZAGESZCZANIA MAS FORMIERSKICH

Zamodelowanie procesu impulsowego zagęszczania masy formierskiej wymaga łącznego rozpatrywania modeli matematycznych głowicy prasującej oraz procesu dynamicznego odkształcania i zagęszczania masy [29][30].

Dotychczas opracowane modele, opisane w rozdz. 3, są niepełne lub zawierają zbyt daleko idące uproszczenia, dlatego żaden z tych modeli nie opisuje w prawidłowy sposób przebieg procesu impulsowego zagęszczania.

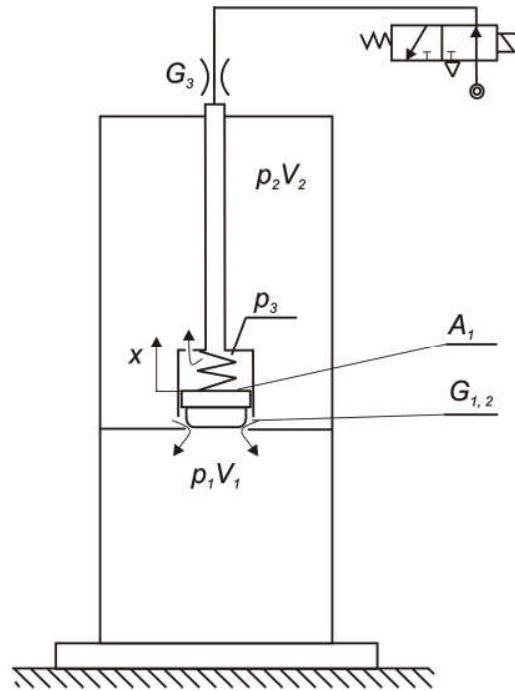
Z tego względu autor rozprawy podjął próbę opracowania takiego modelu, który będzie w pełni opisywał proces impulsowy i który można by stosować w badaniach symulacyjnych, stanowiących podstawę do projektowania i optymalizacji głowic impulsowych maszyn formierskich oraz badania procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

Opracowanie modelu matematycznego procesu impulsowego autor zrealizował w następujących etapach:

- w etapie 1 został opracowany model matematyczny dynamiki głowicy impulsowej z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym,
- w etapie 2 został zaproponowany model matematyczny procesu odkształcania i zagęszczania masy formierskiej,
- w ostatnim etapie sformułowano model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

5.1 Głowica impulsowa z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym

Do impulsowego zagęszczania mas formierskich zastosowano nową, głowicę impulsową GI-2 z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym (rys.5.1) opracowaną w Laboratorium Podstaw Automatyki Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej i produkowaną przez Ośrodek Badawczo-Rozwojowy elementów i Układów Pneumatyki w Kielcach. Budowę i zasadę działania głowicy GI-2 opisano w rozdz.2.1.



Rys.5.1. Schemat głowicy GI-2.

Podstawowe podzespoły głowicy GI-2 stanowią:

- zbiornik akumulacyjny sprężonego powietrza o pojemności $V=50 \text{ dcm}^3$,
- zawór impulsowy o średnicy $\varnothing 100 \text{ mm}$ króćca wylotowego,
- sterujący zawór rozdzielający, dwupołożeniowy, trzydrogowy, jednostronnie sterowany elektromagnetycznie.

Zastosowany w głowicy GI-2 zawór impulsowy ZI charakteryzuje się bardzo dużą dynamiką wewnętrzną, która zapewnia otwarcie wylotu zbiornika akumulacyjnego w bardzo krótkim czasie (rzędu pojedynczych ms), a przez to pozwala na uzyskiwanie bardzo dużych (rzędu kilkuset MPa/s) szybkości narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej nad masą formierską.

Do podstawowych zalet głowicy GI-2 można zaliczyć:

- prostą konstrukcję,
- bardzo dużą dynamikę wewnętrzną zaworu ZI, a przez to samej głowicy impulsowej,
- łatwość sterowania pracą głowicy, w szczególności ze względu na samoczynny, pneumatyczny zawór ZI.

Znajomość dynamiki głowicy impulsowej, jak wspomniano, jest niezbędna do opracowania modelu matematycznego procesu impulsowego, dlatego poniżej został zaprezentowany opracowany przez autora, model matematyczny głowicy GI-2.

5.2 Model matematyczny dynamiki głowicy GI-2

Głowica impulsowa GI-2 jest urządzeniem pneumatycznym, dlatego model jej dynamiki powinien stanowić układ równań różniczkowych opisujących przemiany gazowe w poszczególnych komorach, zachodzące podczas jej pracy.

Model matematyczny dynamiki GI-2 sformułowano przyjmując następujące założenia upraszczające:

- powietrze jest gazem doskonałym,
- procesy termodynamiczne mają charakter quasi statyczny,
- nie ma wymiany ciepła między gazem znajdującym się w komorach głowicy i otoczeniem,
- opory tarcia w uszczelnieniach są pomijalnie małe,
- temperatura powietrza w komorach głowicy jest stała.

Uwzględniając powyższe założenia upraszczające, dynamikę głowicy impulsowej można opisać następującym układem równań różniczkowych:

$$A_1(p_2 - p_3) - c \cdot (x + y_0) - m_1 \cdot g = m_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5.1)$$

$$\frac{-\kappa \cdot R \cdot T \cdot G_2}{V_2} = \frac{dp_2}{dt} \quad (5.2)$$

$$\frac{\kappa}{s-x} \cdot \left(p_3 \cdot \frac{dx}{dt} - \frac{G_3 \cdot R \cdot T}{A_1} \right) = \frac{dp_3}{dt} \quad (5.3)$$

$$\frac{\kappa \cdot R \cdot T \cdot G_1}{V_1} = \frac{dp_1}{dt} \quad (5.4)$$

w którym:

m_1 – masa elementów ruchomych zaworu impulsowego,

x – współrzędna położenia tłoka zaworu ZI,

y_0 – ugięcie wstępne (montażowe) sprężyny zaworu impulsowego,

c – sztywność sprężyny,

p_1, p_2, p_3 – ciśnienie absolutne, odpowiednio w komorach: zbiorniku akumulacyjnym, przestrzeni technologicznej i powrotnej zaworu impulsowego,

A_1 – pole powierzchni tłoka,

s – skok tłoka,

g – przyspieszenie ziemskie,

κ – wykładnik adiabaty,

G_i – natężenie wypływu powietrza z i -tej komory,

R – stała gazowa powietrza,

T – temperatura powietrza zawartego w przestrzeni technologicznej i zbiorniku akumulacyjnym,

V_1 – objętość przestrzeni technologicznej,

V_2 – objętość zbiornika akumulacyjnego.

Zależność określająca natężenie G_i wypływu powietrza z i -tej komory ma następującą postać:

$$G_i = K \cdot \alpha_i \cdot f_i \cdot p_i \cdot \sqrt{\frac{1}{R \cdot T_i}} \cdot \varphi(\varepsilon_i) \quad (5.5)$$

w której:

α_i – współczynnik natężenia przepływu powietrza,

f_b – powierzchnia przekroju poprzecznego otworu wylotowego z i -tej komory,

$$\varepsilon_i = \frac{p_a}{p_i}, \quad K = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1}}$$

p_i – ciśnienie powietrza w i -tej komorze,

p_a – ciśnienie atmosferyczne,

$$\varphi(\varepsilon_i) = \begin{cases} 0,2588 & \text{dla } 0 < \varepsilon_i \leq 0,53 \\ \sqrt{\varepsilon_i^{2/\kappa} - \varepsilon_i^{\kappa+1/\kappa}} & \text{dla } 0,53 < \varepsilon_i \leq 1. \end{cases}$$

Poszczególne równania różniczkowe opisują:

- równanie (5.1) jest równaniem ruchu tłoka zaworu ZI,

- równania (5.2)÷(5.4) stanowią modele przemian gazowych, odpowiednio w komorach zbiornika akumulacyjnego, komorze roboczej zaworu impulsowego, przestrzeni technologicznej.

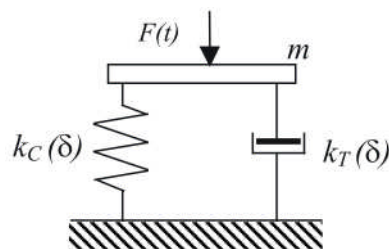
Ocenę dynamiki oraz dobór optymalnych warunków pracy głowicy impulsowej można dokonać na podstawie wyników badań symulacyjnych, przedstawionego wyżej jej modelu matematycznego – układu równań różniczkowych (5.1)÷(5.4)

Rozwiązując układ równań (5.1)÷(5.4) można określić osiągi głowicy impulsowej oraz wielkości charakteryzujące optymalne warunki jej pracy. Ponadto, wyniki badań symulacyjnych mogą służyć do projektowania i optymalizacji konstrukcji głowic impulsowych z pneumatycznymi zaworami impulsowymi.

5.3. Model matematyczny procesu odkształcania i zagęszczania masy formierskiej

W pracy [13] zaprezentowano model reologiczny masy formierskiej, który został zastosowany do zamodelowania procesu dynamicznego prasowania masy płytą prasującą.

Na podstawie eksperymentalnej identyfikacji (metodą charakterystyk czasowych) stwierdzono, że własności reologiczne masy formierskiej można zamodelować lepko-sprężystym modelem reologicznym, który pokazano na rys. 5.2. [18][28][31]



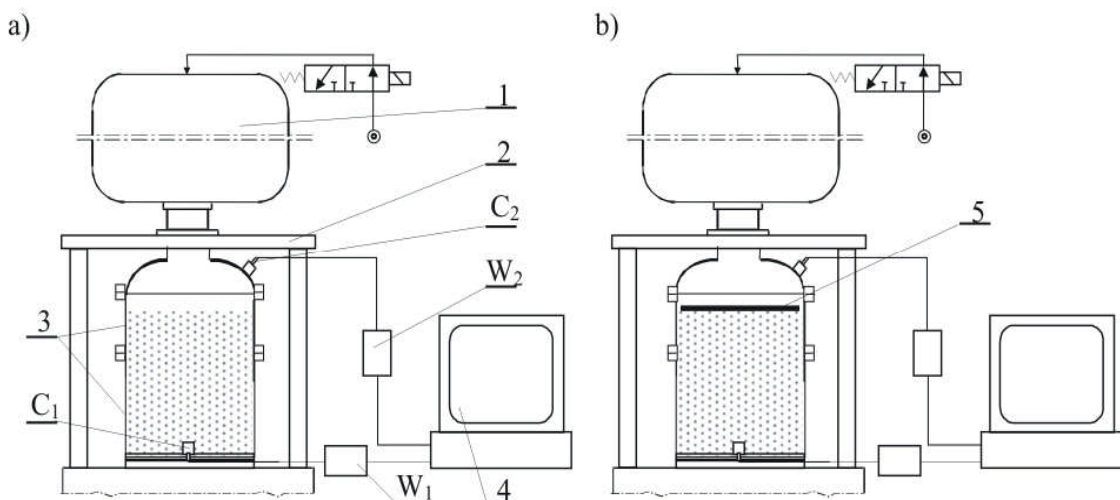
Rys.5.2. Schemat lepko - sprężystego modelu reologicznego masy formierskiej

Przedstawiony model reologiczny masy formierskiej został z powodzeniem zastosowany, jak już wspomniano, do zamodelowania procesu dynamicznego prasowania płytą. Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych tego procesu udowodniły, że opisuje on bardzo dobrze własności reologiczne masy i w efekcie wyniki badań symulacyjnych procesu prasowania płytą wykazują bardzo dobrą zbieżność z wynikami badań eksperymentalnych.

Jednakże, zastosowanie omawianego modelu reologicznego masy do opisu innego procesu dynamicznego zagęszczania mas formierskich (zagęszczania impulsowego), charakteryzującego się innym czynnikiem zagęszczającym masę, którym jest strumień sprężonego powietrza, wymagało udowodnienia, że zagęszczana masa będzie się zachowywała podobnie jak podczas zagęszczania płytą. Bowiem wątpliwości dotyczące podobieństwa tych procesów dotyczyły przede wszystkim oddziaływania płyty prasującej i strumienia sprężonego powietrza na masę formierską. Można tu wymienić np. wątpliwość związaną z tym czy w procesie impulsowym nie następuje penetracja masy przez strumień sprężonego powietrza podczas jej zagęszczania.

Autor wykazał jednoznacznie, na podstawie zrealizowanych badań eksperymentalnych, które zostaną przedstawione poniżej, że nie ma żadnych różnic w mechanizmie dynamicznego zagęszczania mas formierskich metodami: impulsową i dynamicznego prasowania płytą. Uzyskane wyniki badań wykazały jednoznacznie, że do zamodelowania procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich można stosować lepko-sprężysty model reologiczny masy formierskiej [14].

Badania eksperymentalne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich zrealizowano na stanowisku badawczym wyposażonym w głowicę GI-2, które pokazano na rys 5.3.



Rys 5.3. Schemat stanowiska badawczego do realizacji różnych wariantów procesu dynamicznego zagęszczania mas formierskich: impulsowego (a) oraz prasowania płytą prasującą (b); głowica GI-2 (1), konstrukcja nośna (2), skrzynka formierska i ramka nadmiarowa (3), komputer PC (4), płyta prasująca (5), C₁ i C₂ – czujniki ciśnienia typ 601 H, W₁ i W₂ – wzmacniacze ładunku typ 5001

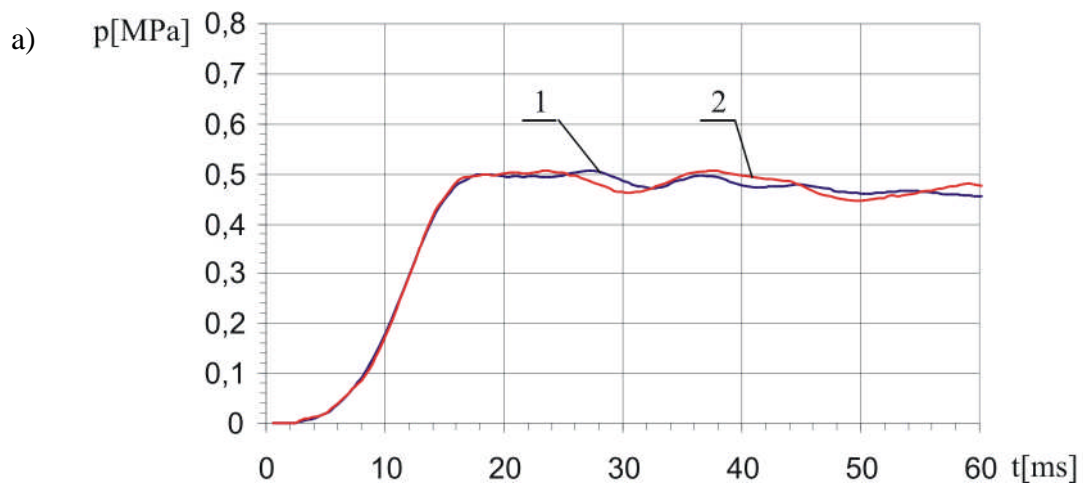
Prezentowane stanowisko badawcze umożliwia realizację następujących odmian dynamicznego zagęszczania mas formierskich:

- zagęszczanie impulsowe, realizowane bezpośrednio strumieniem sprężonego powietrza
- prasowanie płytą, realizowane za pomocą luźnej płyty umieszczonej na górnej powierzchni słupa zagęszczanej masy formierskiej.

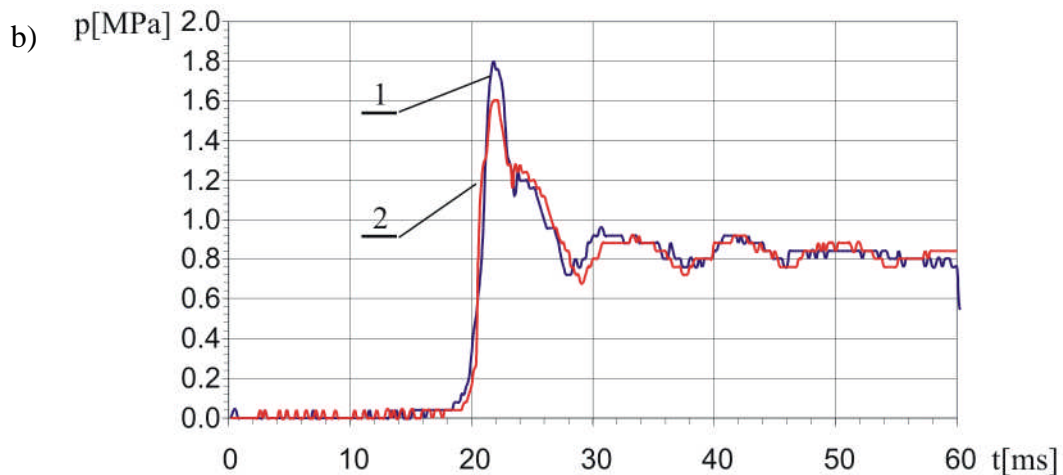
Stanowisko badawcze jest wyposażone w tory pomiarowe do pomiaru ciśnienia sprężonego powietrza w wybranych punktach pomiarowych oraz w warstwach masy położonych w okolicach płyty modelowej. Tor pomiarowy tworzą piezoelektryczne czujniki ciśnienia (C_1 i C_2) wraz ze wzmacniaczami ładunku (W_1 i W_2) firmy Kistler. Do rejestracji sygnałów ze wzmacniaczy ładunku zastosowano komputer PC z kartą pomiarową typ TAD 05.

Podczas badań procesów: impulsowego i prasowania płytą rejestrowano zmiany ciśnienia w przestrzeni nad masą oraz zmiany nacisków w warstwach masy położonych przy płycie modelowej.

Wyniki pomiarów ciśnienia w przestrzeni nad masą formierską w funkcji czasu, zarejestrowane podczas zagęszczania impulsowego i dynamicznego prasowania zamieszczono na rys 5.4a, natomiast zależności zmian nacisków w masie formierskiej w funkcji czasu pokazano na rys. 5.4b.



Do rys.5.4.



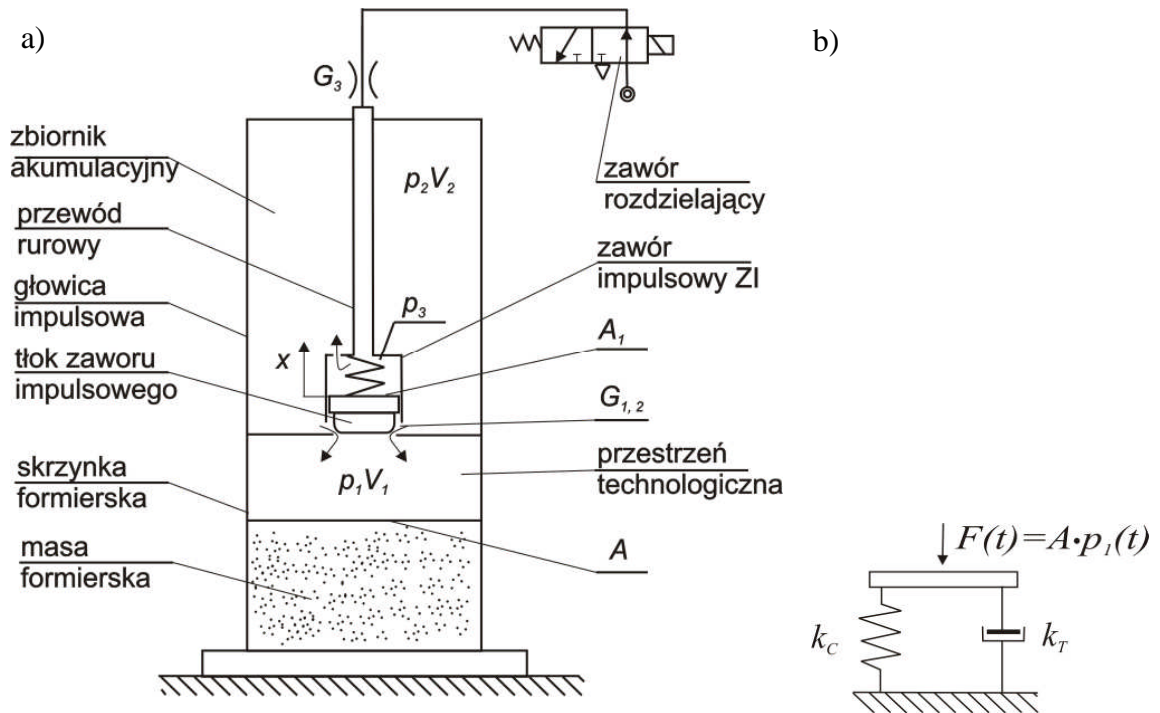
Rys 5.4. Zmiany ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej nad masą formierską podczas procesów: impulsowego (1) i prasowania płytą (2) (a) oraz zmiany nacisków w masie formierskiej w czasie procesów: impulsowego (1) i prasowania płytą (2) (b)

Zależności zmian ciśnienia w przestrzeni nad masą formierską (rys.5.4a) są identyczne. Można zatem twierdzić że masa, niezależnie od sposobu jej zagęszczenia, wykazuje takie same opory podczas jej odkształcania i zagęszczenia.

Na podstawie analizy zależności pokazanych na rys 5.4b można twierdzić, że nie wykazują one zasadniczych różnic w zależności od sposobu zagęszczenia masy, zatem przebieg procesu odkształcania i zagęszczenia masy jest identyczny w przypadku impulsowego zagęszczenia i dynamicznego prasowania płytą.

Wyjaśnienie faktów, stwierdzonych w sposób eksperymentalny, zawiera się w szybkości realizacji procesów dynamicznego zagęszczenia mas formierskich. Ona bowiem sprawia, że sprężone powietrze zagęszczające masę zachowuje się podobnie jak sztywny tłok i w związku z tym w procesie impulsowym strumień powietrza zachowuje się tak samo jak płyta prasująca podczas procesu dynamicznego prasowania.

Na podstawie analizy przedstawionych wyników badań można jednoznacznie stwierdzić, że do zamodelowania procesu impulsowego zagęszczenia mas formierskich można zastosować lepko-sprężysty model reologiczny masy (rys. 5.5b)



Rys.5.5. Schemat procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich (a), lepko-sprężysty model reologiczny masy formierskiej (b)

Uwzględniając model dynamiki głowicy impulsowej oraz model reologiczny masy formierskiej proces impulsowego zagęszczania mas formierskich można opisać następującym układem równań różniczkowych:

$$p_1 \cdot A_1 = m_2 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + k_T(\delta) \cdot \frac{dy(t)}{dt} + k_C(\delta) \cdot y(t) \quad (5.6)$$

$$A_1(p_2 - p_3) - c \cdot (x + y_0) - m_1 \cdot g = m_1 \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5.7)$$

$$\frac{-\kappa \cdot R \cdot T \cdot G_2}{V_2} = \frac{dp_2}{dt} \quad (5.8)$$

$$\frac{\kappa}{s-x} \cdot \left(p_3 \cdot \frac{dx}{dt} - \frac{G_3 \cdot R \cdot T}{A_1} \right) = \frac{dp_3}{dt} \quad (5.9)$$

$$\frac{\kappa}{y} \cdot \left(\frac{G_1 \cdot R \cdot T}{A_1} - p_1 \cdot \frac{dy}{dt} \right) = \frac{dp_1}{dt} \quad (5.10)$$

w którym:

m_2 – masa porcji zagęszczanej masy formierskiej.

Poszczególne równania opisują:

- równanie (5.6) – proces odkształcania masy formierskiej,
- równanie (5.7) – ruch tłoka zaworu ZI,
- równania (5.8 – 5.10) – przemiany gazowe odpowiednio w komorach: zbiornika akumulacyjnego, roboczej zaworu impulsowego oraz przestrzeni technologicznej nad masą formierską.

Podczas procesu prasowania masy formierskiej następuje jej odkształcenie, bez możliwości odkształceń bocznych, które uniemożliwia skrzynka formierska. Następstwem tego jest plastyczne płynięcie masy i jej umocnienie (zagęszczenie).

Na podstawie analizy procesu odkształcenia i zagęszczania masy formierskiej można stwierdzić, że:

- w stanach nieustalonych (od momentu rozpoczęcia do momentu zakończenia odkształcania masy) naciski w masie formierskiej stanowią sumę nacisków wewnętrznych związanych z odkształceniem i tarciem wewnętrznym masy (reprezentują je naciski przenoszone przez element sprężysty i lepki modelu reologicznego) oraz będących efektem zagęszczenia masy (ich wartość zależy od stopnia zagęszczenia masy),
- w stanie ustalonym (następuje w momencie zakończenia odkształcania się masy) nacisk w masie formierskiej jest sumą nacisków, które wywołują; nacisk prasujący słupa sprężonego powietrza oraz zagęszczenie masy, które wyraża wytrzymałość jaką masa uzyskała w wyniku zagęszczenia.

Zatem, nacisk całkowity w masie formierskiej zagęszczanej impulsowo można opisać zależnością

$$p_C = \frac{k_c(\delta) \cdot x + k_T(\delta) \cdot \dot{x}}{A} + p_U(\delta) \quad (5.11)$$

w której:

p_C – nacisk całkowity w masie formierskiej,

p_U – nacisk będący efektem zagęszczenia masy,

δ – stopień zagęszczenia masy,

A – powierzchnia przekroju poprzecznego skrzynki formierskiej.

Umocnienie p_U masy formierskiej można opisać następującą zależnością empiryczną

$$p_U = k(p_0) \cdot E(\delta) \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (5.12)$$

w której:

$$k(p_0) = d_1 \cdot p_0^2 + d_2 \cdot p_0 + d_3 \quad (5.13)$$

gdzie: d_i – współczynniki,

$E=f(\delta)$ – moduł sprężystości masy w funkcji stopnia zagęszczenia.

Moduł sprężystości $E(\delta)$ można z kolei wyznaczyć z zależności [44][58]

$$V_L(\delta) = \sqrt{\frac{E(\delta)}{\rho(\delta)}} \quad (5.14)$$

w której:

$V_L(\delta)$ – prędkość ultradźwiękowej fali podłużnej w masie formierskiej w funkcji jej stopnia zagęszczenia,

$\rho(\delta)$ – gęstość pozorna masy formierskiej w funkcji jej stopnia zagęszczenia.

Po przekształceniu równania (5.14) moduł sprężystości ma następującą postać

$$E(\delta) = V_L^2(\delta) \cdot \rho(\delta) \quad (5.15)$$

Ostatecznie, model matematyczny procesu impulsowego zagęszczenia mas formierskich stanowi układ równań (5.1)-(5.10).

Ponadto należy wyjaśnić, że do badań symulacyjnych sformułowanego w tym rozdziale modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczenia masy wymagana jest znajomość współczynników $k_C(\delta)$ i $k_T(\delta)$ modelu reologicznego masy formierskiej. Określają one zmiany własności sprężystych i lepkich podczas jej dynamicznego zagęszczenia. Zależności $k_C(\delta)$ i $k_T(\delta)$ można wyznaczyć na podstawie wyników badań ultradźwiękowych, które sprowadzają się do pomiarów fali podłużnej w funkcji stopnia zagęszczenia masy formierskiej. Badania ultradźwiękowe mas formierskich i sposób wyznaczania współczynników $k_C(\delta)$ i $k_T(\delta)$ opisano w pracy [13].

Wobec powyższego jedynym wymaganiem wstępnym, koniecznym do realizacji badań symulacyjnych opracowanego przez autora modelu matematycznego procesu impulsowego, jest wykonanie badań ultradźwiękowych masy formierskiej.

6. BADANIA SYMULACYJNE I EKSPERYMENTALNE GŁOWICY GI-2

Podstawowym celem tej części pracy była realizacja badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych dynamiki głowicy impulsowej z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym.

Badania zrealizowano w następujących etapach:

- w pierwszym etapie przeprowadzono badania symulacyjne opracowanego modelu matematycznego głowicy impulsowej,
- w następnym etapie wykonano badania eksperymentalne dynamiki głowicy impulsowej,
- w ostatnim etapie dokonano analizy wyników badań symulacyjnych eksperymentalnych, dynamiki głowicy impulsowej, na podstawie których określono dokładność opisu analitycznego dynamiki głowicy.

6.1. Badania symulacyjne dynamiki głowicy impulsowej

Badania symulacyjne dynamiki głowicy impulsowej zrealizowano dla głowicy, którą charakteryzują następujące parametry:

- objętość zbiornika akumulacyjnego $V_0=50 \text{ dcm}^3$,
- skok tłoka zaworu impulsowego $s=50 \text{ mm}$,
- masa elementów ruchomych zaworu impulsowego $m_1=1,9 \text{ kg}$,
- średnica otworu wylotowego zaworu impulsowego $d_1=12 \text{ mm}$,
- średnica otworu wylotowego głowicy impulsowej $d_2=100 \text{ mm}$.

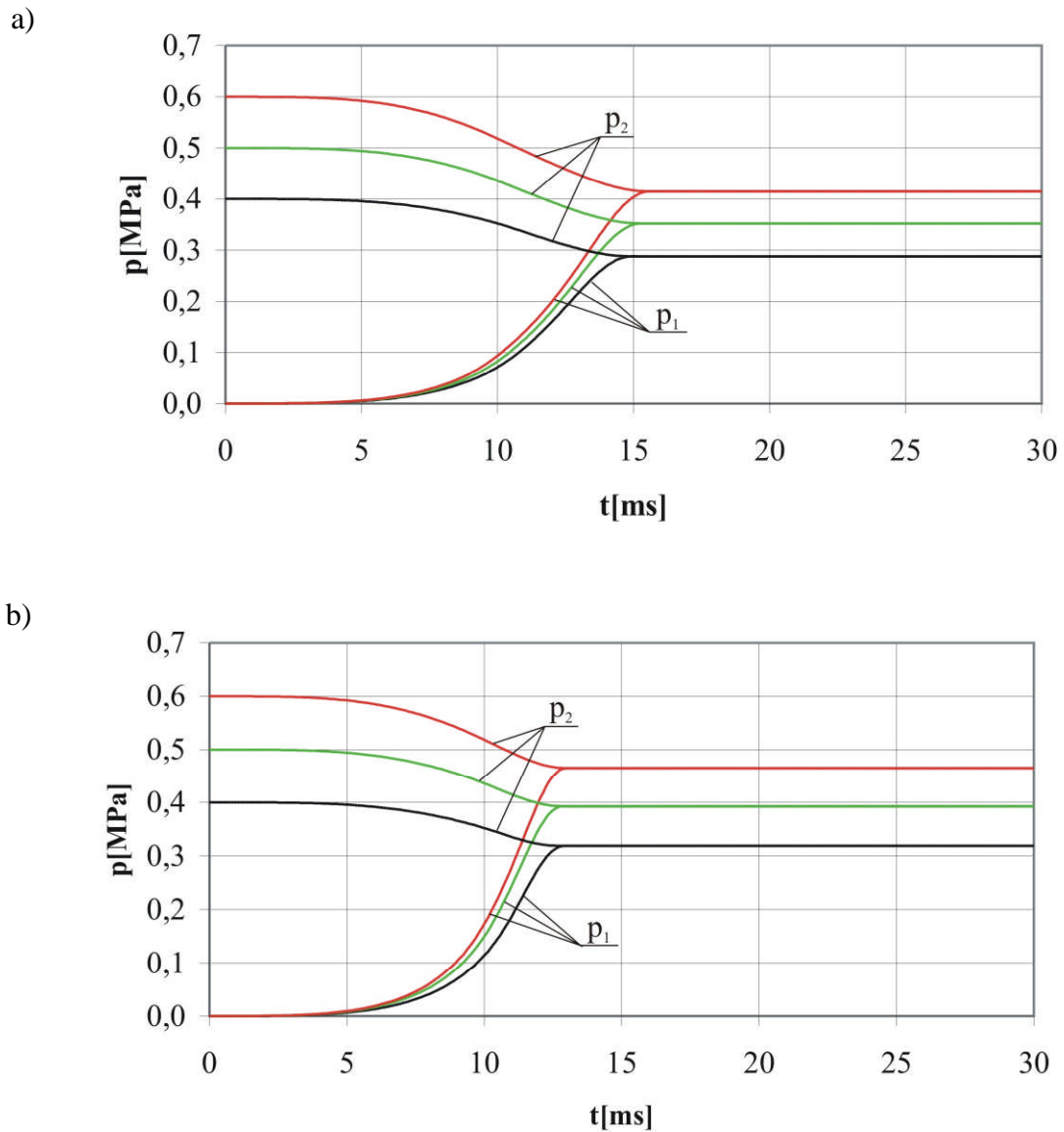
Badania symulacyjne modelu matematycznego dynamiki głowicy impulsowej przeprowadzono w środowisku Matlab-Simulink [45] (patrz załącznik A), przyjmując następujące warunki początkowe:

- współczynnik przepływu powietrza $\alpha_i=1$,
- wykładnik adiabaty $\kappa=1,4$,
- temperatura powietrza i-tej komory $T_i=298 \text{ K}$,
- stała gazowa powietrza $R=287 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$,
- przyspieszenie ziemskie $g=9,81\text{m}/\text{s}^2$.

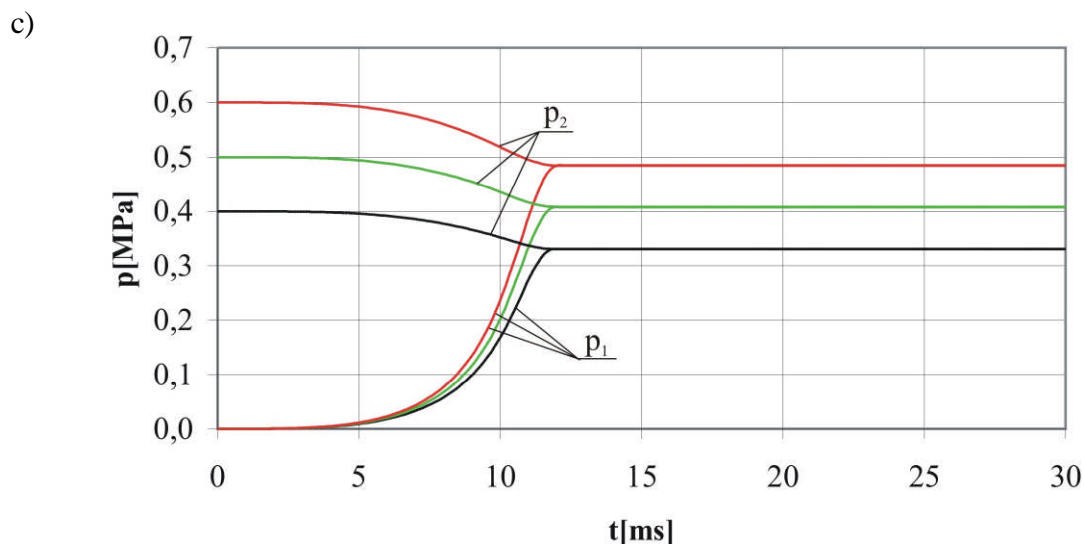
Badania symulacyjne zrealizowano przyjmując trzy różne wartości objętości V_1 przestrzeni technologicznej, w zakresie 8,5-10,5-16 dcm^3 , oraz trzy różne wartości

ciśnienia początkowego p_0 w zbiorniku akumulacyjnym głowicy, w zakresie 0,4-0,5-0,6 MPa.

Na rysunku 6.1 zaprezentowano zależności zmian ciśnień: w zbiorniku akumulacyjnym i przestrzeni technologicznej odpowiadające odpowiednio objętości $V_1=8,5-10,5-16$ dcm³ oraz różnym ciśnieniom początkowym p_0 sprężonego powietrza w zbiorniku akumulacyjnym.



Do rys. 6.1.



Rys.6.1. Zależności zmian ciśnienia (p_1) w przestrzeni technologicznej o objętościach wynoszących odpowiednio $V_1=16 \text{ dcm}^3$ (a), $V_1=10,5 \text{ dcm}^3$ (b) $V_1=8,5 \text{ dcm}^3$ (c) i zbiorniku akumulacyjnym (p_2) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia początkowego w zbiorniku akumulacyjnym głowicy impulsowej wynoszących odpowiednio $p_0=0,4-0,5-0,6 \text{ MPa}$

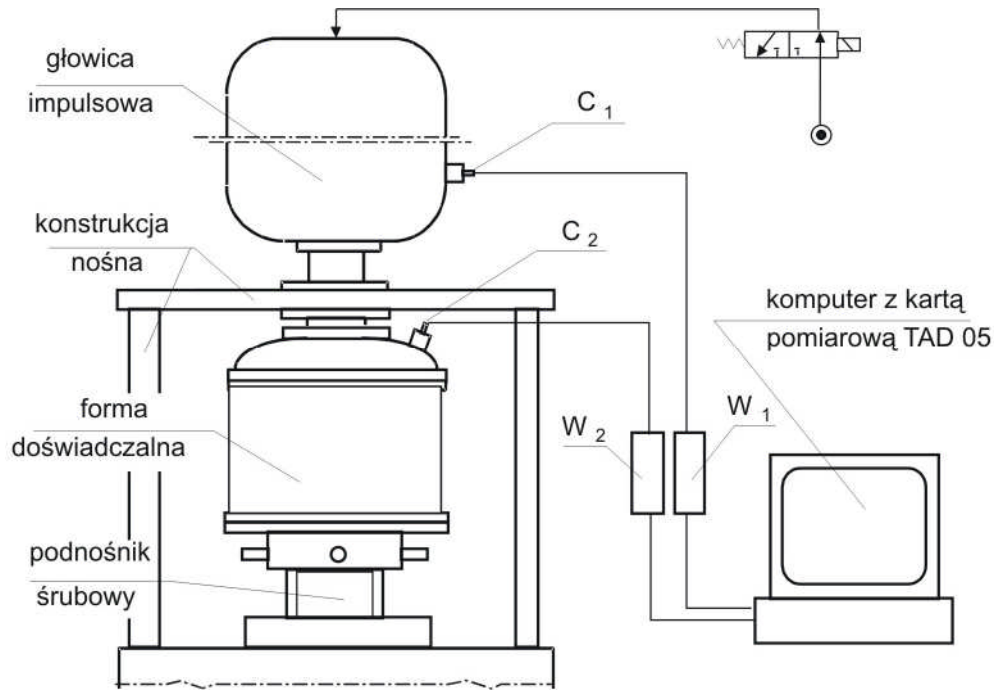
6.2. Badania eksperymentalne dynamiki głowicy impulsowej

Badania eksperymentalne dynamiki jednozaworowej głowicy impulsowej zrealizowano na stanowisku badawczym, które pokazano na rysunku 6.2. Stanowisko składa się z następujących podzespołów: jednozaworowej głowicy impulsowej, konstrukcji nośnej, formy doświadczalnej oraz podnośnika śrubowego.

Stanowisko badawcze jest wyposażone w układ do pomiarów ciśnień dynamicznych, który stanowią czujniki ciśnienia i wzmacniacze ładunku firmy Kistler. Do rejestracji sygnałów ze wzmacniaczy ładunku zastosowano komputer PC z kartą pomiarową typu TAD 05.

Badania eksperymentalne dynamiki głowicy impulsowej umożliwiły wyznaczenie zależności zmian ciśnień w zbiorniku akumulacyjnym głowicy impulsowej i w przestrzeni technologicznej.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych dynamiki głowicy impulsowej przedstawiono na rys. 6.3.-6.5. W celu oceny dokładności opracowanego modelu matematycznego dynamiki głowicy impulsowej na rys. 6.3-6.5 zamieszczono również wyniki badań symulacyjnych modelu dynamiki głowicy impulsowej.

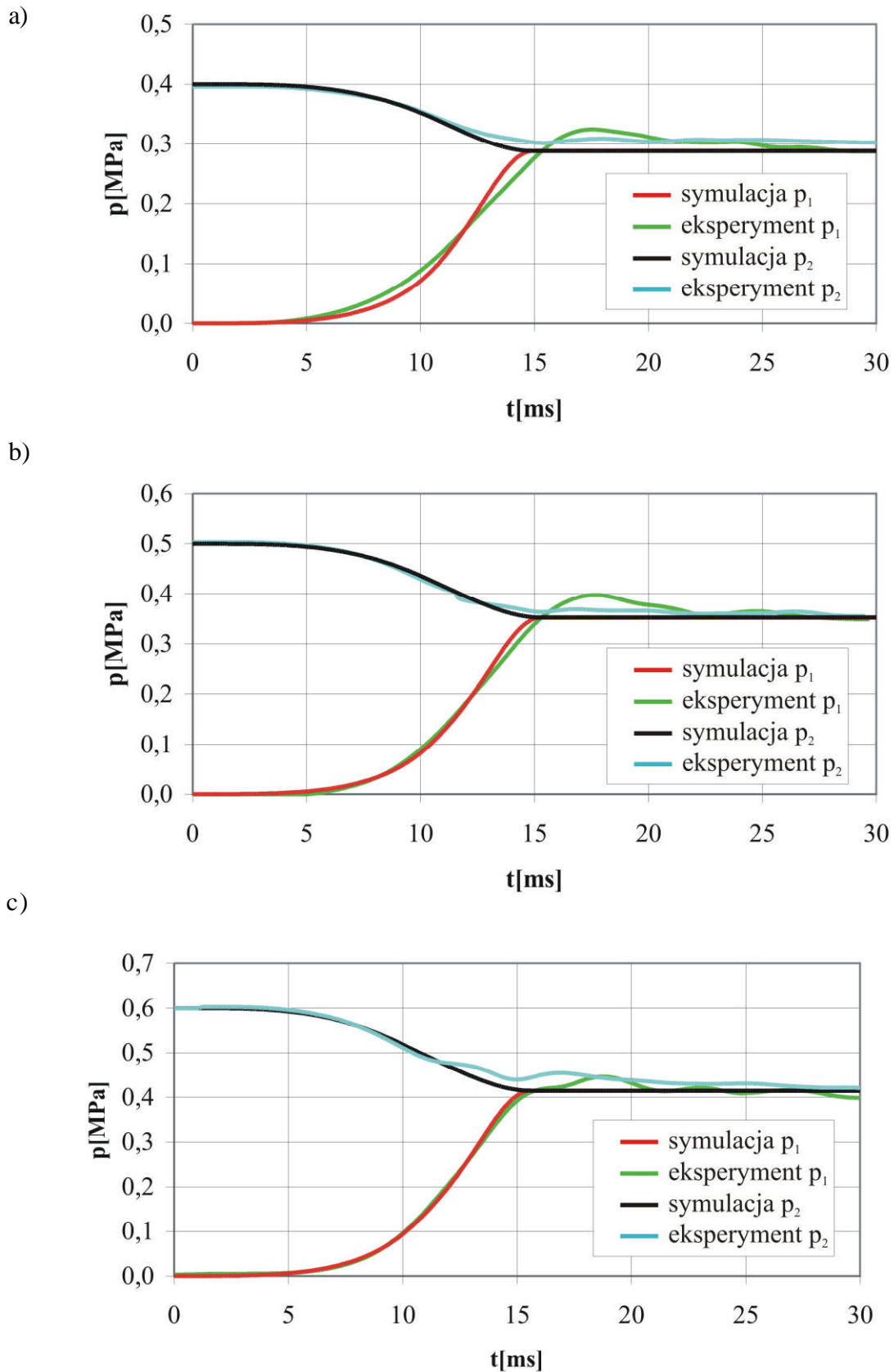


Rys.6.2. Schemat stanowiska do badania dynamiki jednozaworowej głowicy impulsowej: C_1, C_2 – czujniki ciśnienia typ 601 H, W_1, W_2 – wzmacniacze ładunku typ 5001

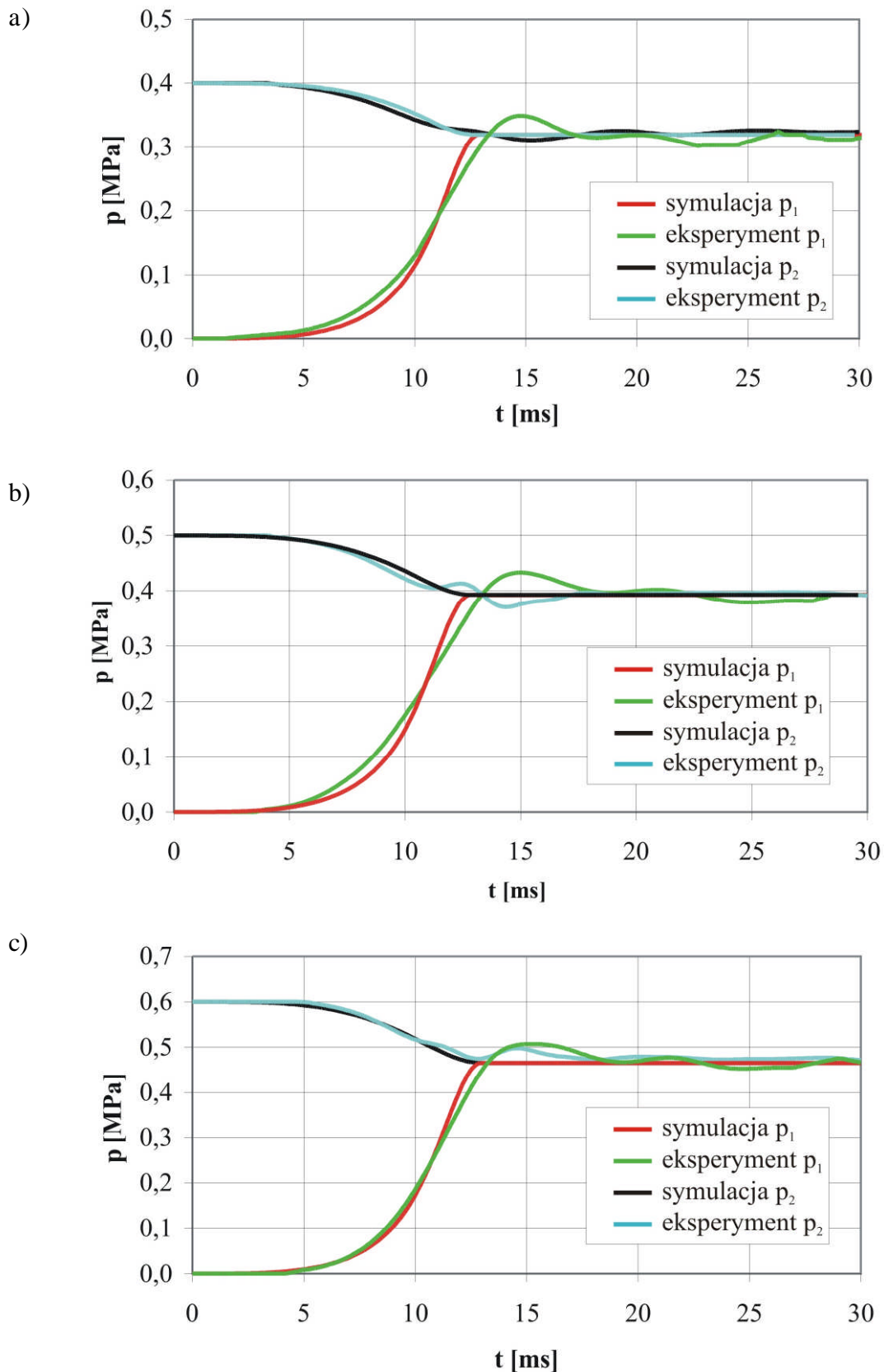
Na rysunku 6.3. przedstawiono zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych z użyciem różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4 MPa (a), 0,5 MPa (b), 0,6 MPa (c) dla $V_1=16 \text{ dcm}^3$

Na rysunku 6.4. przedstawiono zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych z użyciem różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4 MPa (a), 0,5 MPa (b), 0,6 MPa (c) dla $V_1=10,5 \text{ dcm}^3$

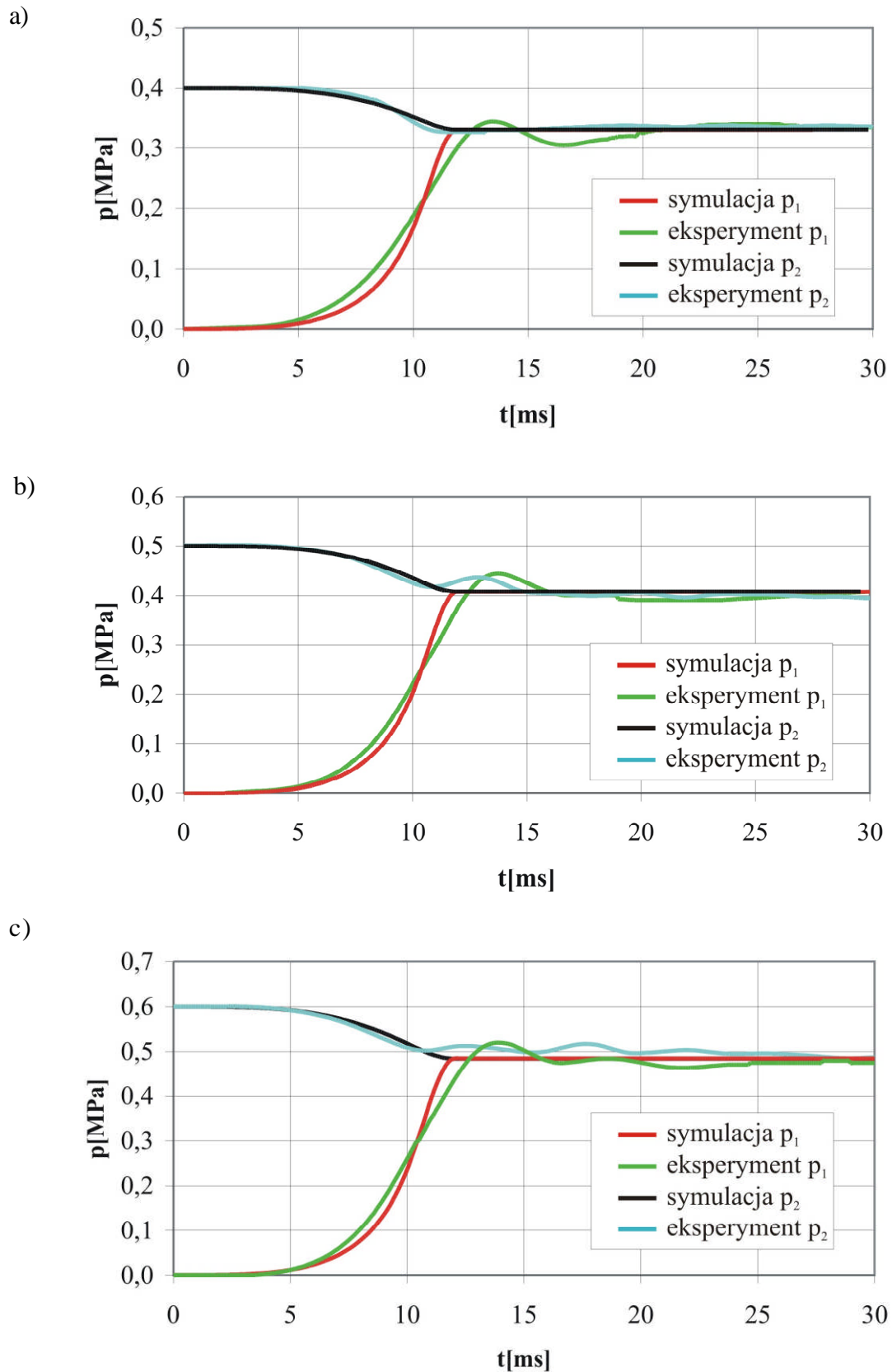
Na rysunku 6.5. przedstawiono zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych z użyciem różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4 MPa (a), 0,5 MPa (b), 0,6 MPa (c) dla $V_1=8,5 \text{ dcm}^3$



Rys 6.3. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych z użyciem różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4 MPa (a), 0,5 MPa (b), 0,6 MPa (c) dla $V_1=16 \text{ dcm}^3$



Rys 6.4. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych z użyciem różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4 MPa (a), 0,5 MPa (b), 0,6 MPa (c) dla $V_1=10,5 \text{ dcm}^3$



Rys 6.5. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych z użyciem różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4 MPa (a), 0,5 MPa (b), 0,6 MPa (c) dla $V_1=8,5$ dcm³

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych dynamiki głowicy impulsowej można stwierdzić, że charakter zmierzonych parametrów, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym, jest bardzo zbliżony do wyników badań symulacyjnych, otrzymanych w wyniku symulacji cyfrowych, opracowanego przez autora, modelu matematycznego dynamiki głowicy impulsowej.

6.3 Analiza wyników badań głowicy impulsowej

Weryfikację przyjętego modelu matematycznego dokonano na podstawie porównania wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych zależności zmian ciśnień w zbiorniku akumulacyjnym oraz przestrzeni technologicznej. Na podstawie analizy zależności pokazanych na rys. 6.3-6.5 można stwierdzić, że model matematyczny z bardzo dobrym przybliżeniem opisuje dynamikę głowicy impulsowej. Świadczą o tym nieznaczne, mieszczące się w zakresie kilku procent, różnice wartości przebiegów zmian ciśnień sprężonego powietrza w wybranych komorach głowicy.

Efektom bardzo dobrych osiągnięć samoczynnego zaworu pneumatycznego jest bardzo duża dynamika wewnętrzna oraz bardzo krótki czas otwierania, pozwalająca na uzyskiwanie dużych szybkości narastania ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej, rzędu kilkuset MPa/s. Efektom określonych osiągnięć samoczynnego zaworu impulsowego jest charakter zależności zmian ciśnienia powietrza w przestrzeni technologicznej w funkcji czasu. Zależność tą przedstawia krzywa wykładnicza mająca punkt przegięcia. Jej charakter wskazuje, że w początkowym okresie szybkość narastania ciśnienia gwałtownie zwiększa się, a po osiągnięciu maksimum (w punkcie przegięcia krzywej) maleje.

Zaprezentowane w tym rozdziale wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych głowicy impulsowej, z samoczynnym, pneumatycznym zaworem impulsowym, wykazały, że:

- przyjęty model matematyczny (układ równań różniczkowych) bardzo dobrze opisuje jej dynamikę,
- charakteryzuje się ona bardzo dużą dynamiką wewnętrzną.

Opracowany model matematyczny głowicy impulsowej może stanowić podstawę do opracowania modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

7. BADANIA PROCESU IMPULSOWEGO ZAGĘSZCZANIA MAS FORMIERSKICH

Podstawowym celem tej części pracy była realizacja badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych dynamiki procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich [27] [38].

Badania zrealizowano w kilku etapach:

- W pierwszym etapie przeprowadzono ultradźwiękowe badania mające na celu określenie parametrów modelu reologicznego badanych mas formierskich, tzn. zależności charakteryzujących własności lepkie $k_T=f(\delta)$ i sprężyste $k_C=f(\delta)$ mas.
- W kolejnym etapie zastosowano, wyznaczone eksperymentalnie, parametry charakteryzujące własności reologiczne mas formierskich do realizacji badań symulacyjnych opracowanego modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.
- W następnym etapie realizowano badania eksperymentalne dynamiki procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.
- W ostatnim etapie dokonano analizy wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych dynamiki procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. Na jej podstawie określono dokładność opisu analitycznego (modelu matematycznego) dynamiki procesu.

Masy użyte do badań

Do badań stosowano masy formierskie o następujących składach:

Masa I:

- piasek kwarcowy -90,5 %
- bentonit „Specjal” -6%,
- pył węglowy -1,5%,
- woda -2,24÷3,38%

Masa II:

- piasek kwarcowy -90,5 %
- bentonit „Geco” -6%,
- pył węglowy -1,5%,
- woda -2,18÷3,35%

7.1 Badania symulacyjne modelu matematycznego procesu dynamicznego prasowania mas formierskich

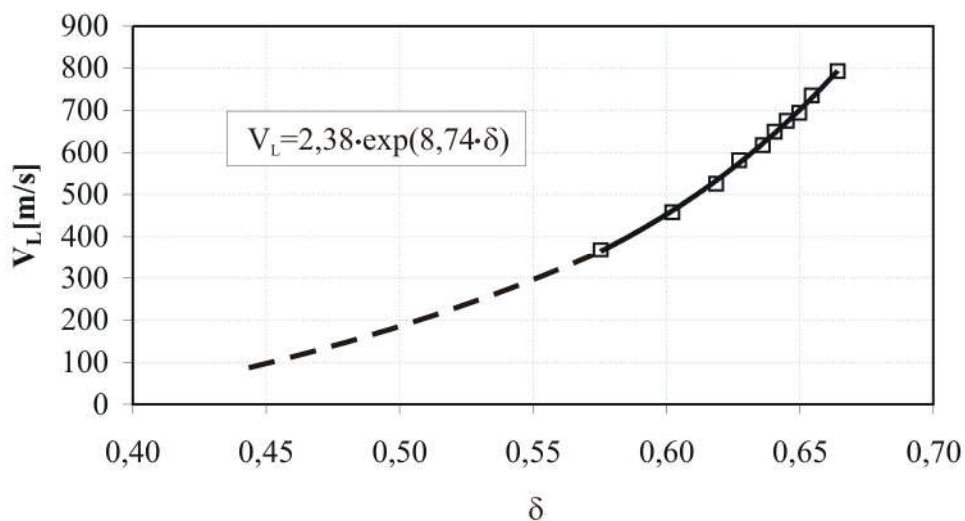
Badania symulacyjne modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich przeprowadzono w środowisku Matlab-Simulink (patrz załącznik B). Badania symulacyjne wymagają, jak już wiadomo, znajomości zależności $k_C=f(\delta)$ i $k_T=f(\delta)$ określających właściwości sprężyste i lepkie masy formierskiej. Można je określić na podstawie znajomości zależności $V_L=f(\delta)$, przedstawiającej prędkość ultradźwiękowej fali podłużnej rozchodzącej się w masie formierskiej w funkcji stopnia zagęszczenia masy.

Zatem jedynym warunkiem wstępnym badań symulacyjnych jest konieczność przeprowadzenia badań ultradźwiękowych mas formierskich i określenie ich charakterystyk $V_L=f(\delta)$.

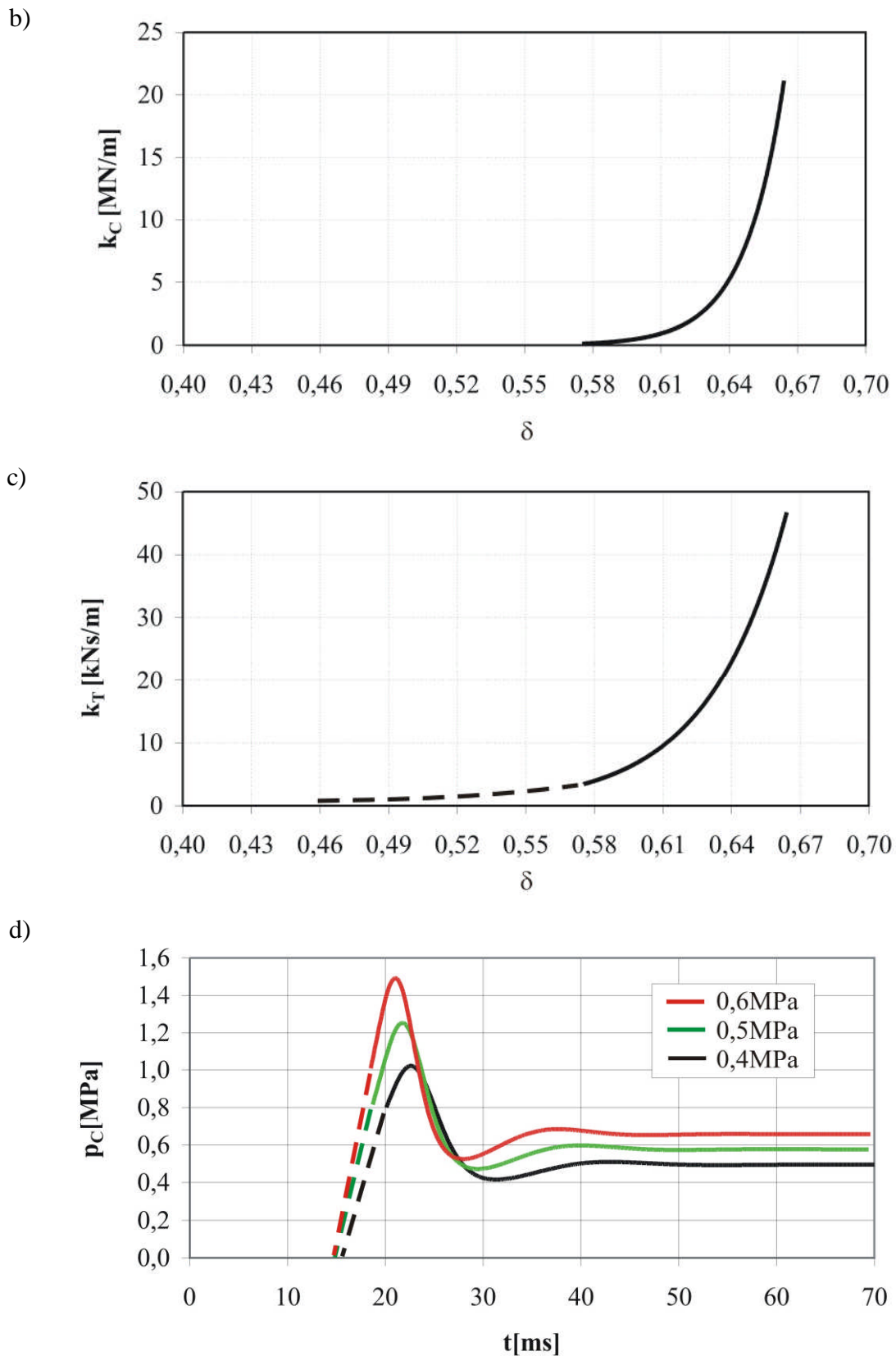
Dlatego badania symulacyjne modelu matematycznego procesu dynamicznego prasowania mas formierskich zostały poprzedzone wykonaniem badań ultradźwiękowych wszystkich badanych mas. W efekcie uzyskane wyniki badań ultradźwiękowych pozwoliły na określenie zależności $k_C=f(\delta)$ i $k_T=f(\delta)$ dla wszystkich badanych mas formierskich.

Na rysunkach 7.1 – 7.4 pokazano wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$, zależności $k_C=f(\delta)$ i $k_T=f(\delta)$ oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa oraz różnych zawartościach wody dla masy nr I.

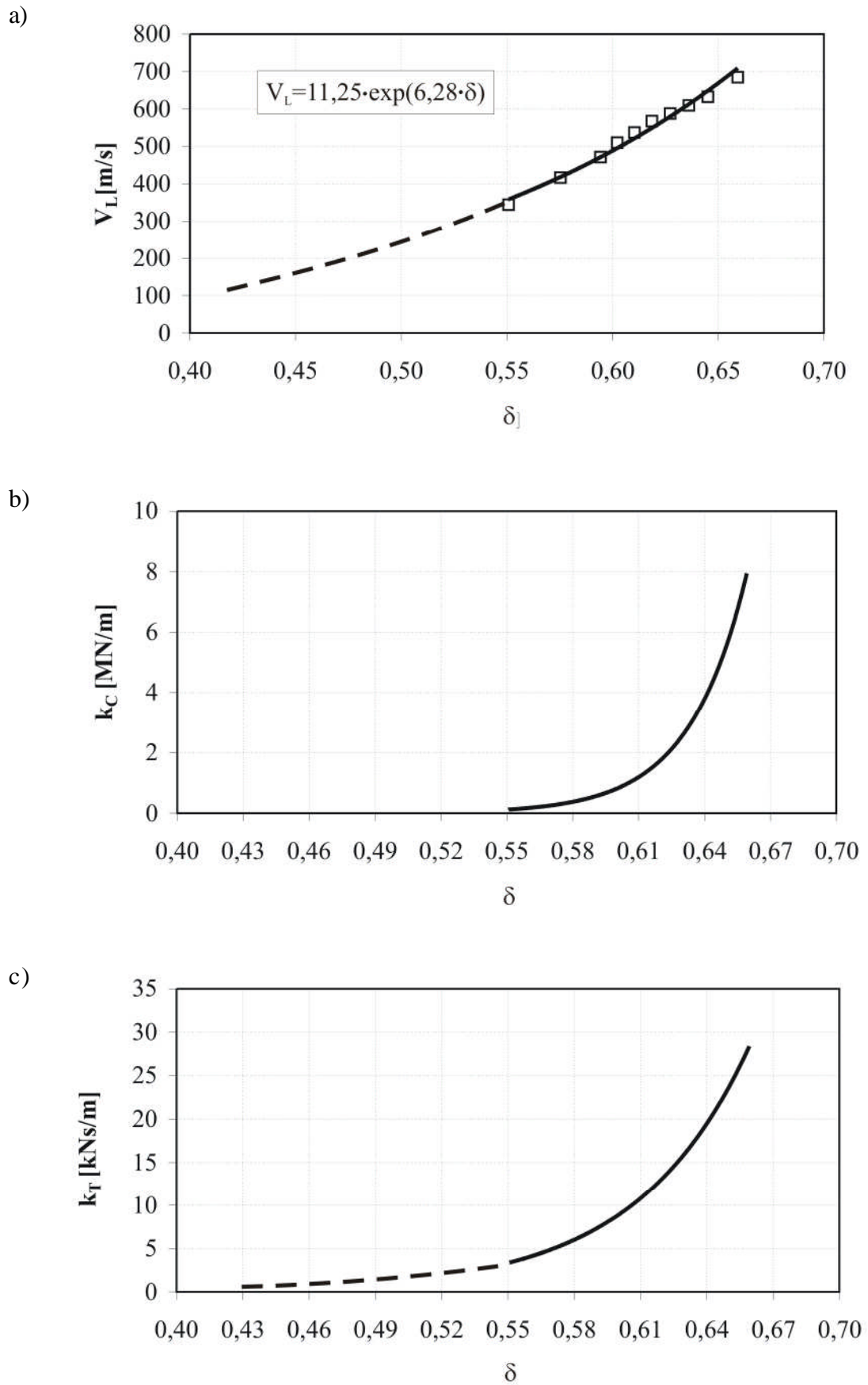
a)



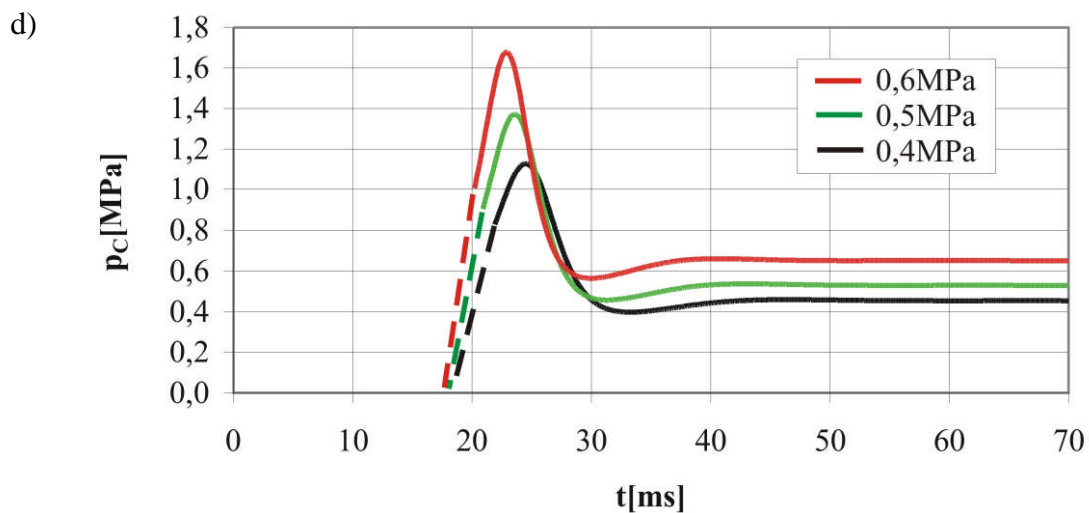
Do rys. 7.1.



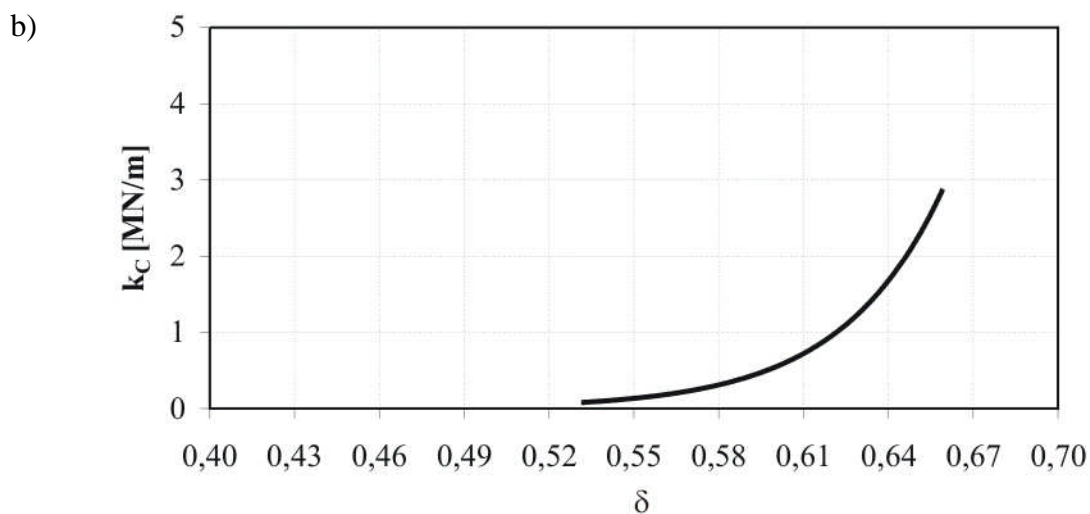
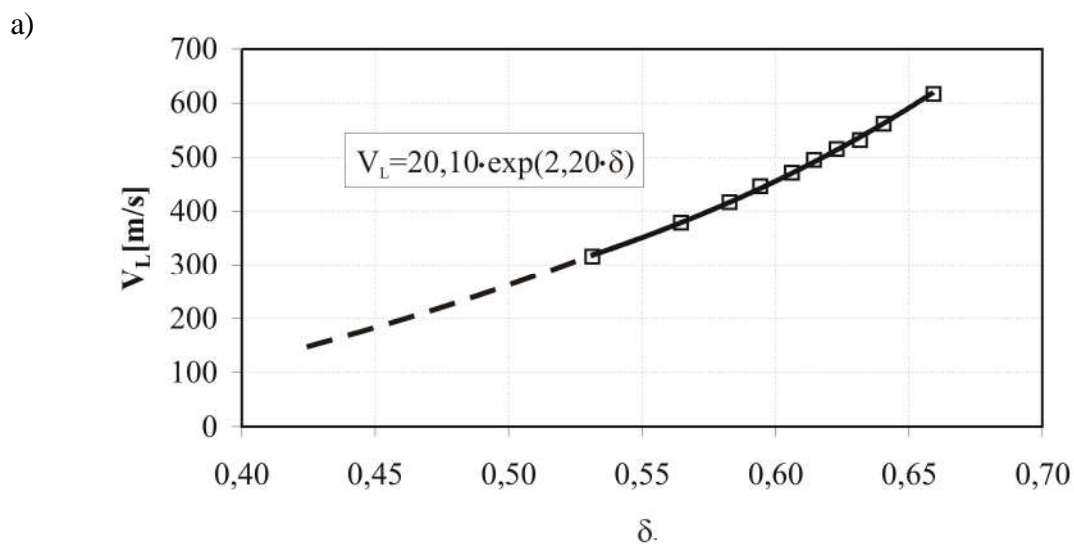
Rys.7.1. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=2,24\%$



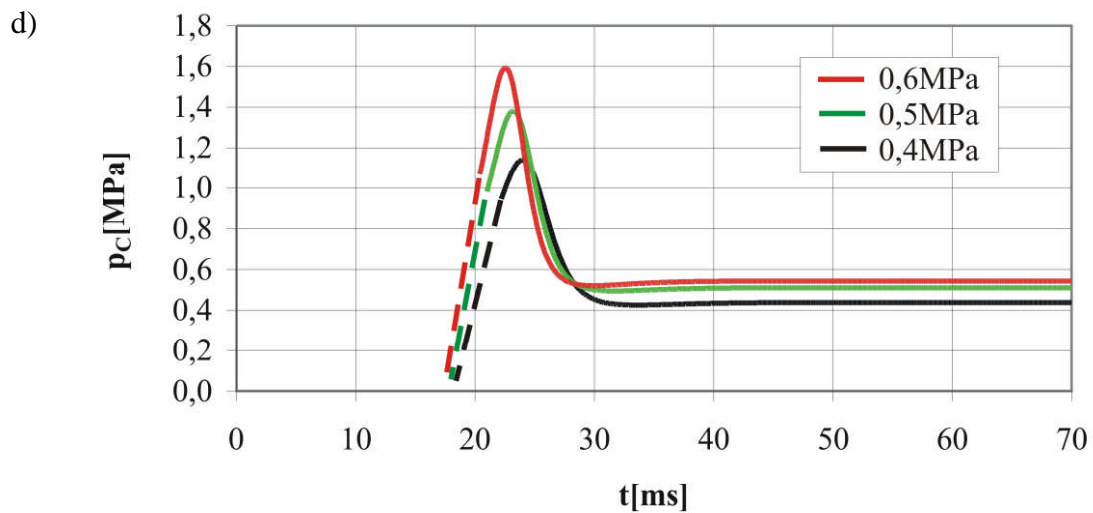
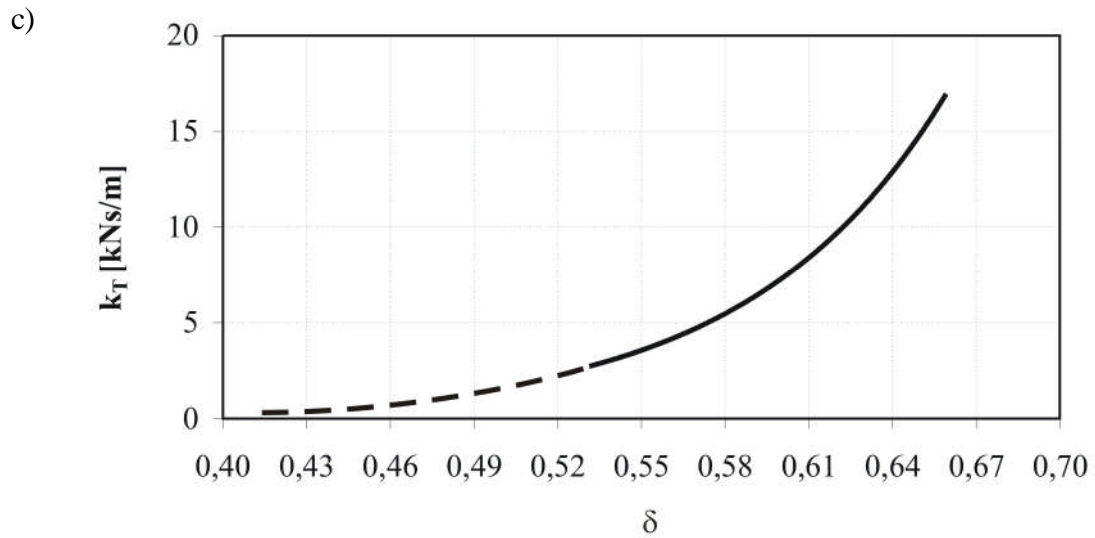
Do rys. 7.2.



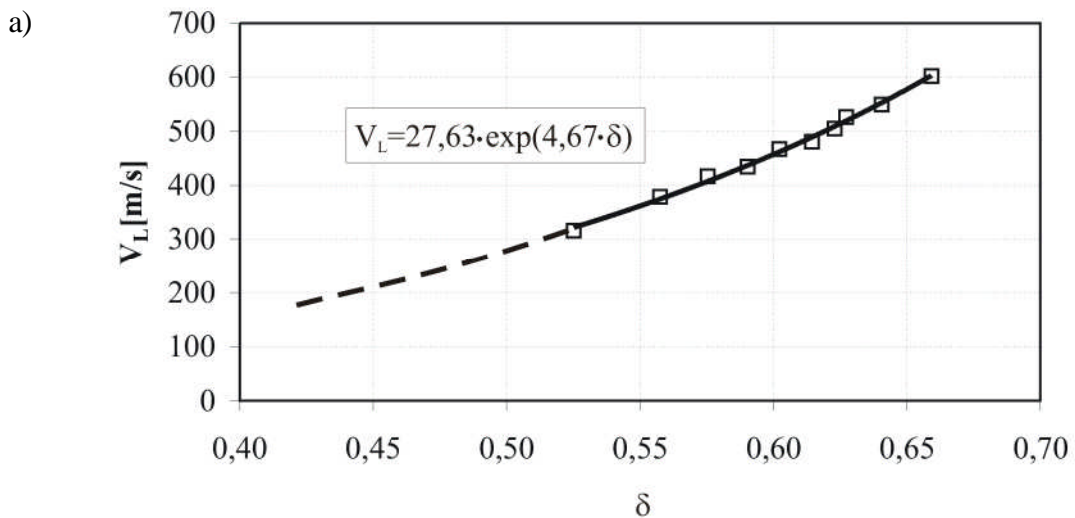
Rys.7.2. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=2,62\%$



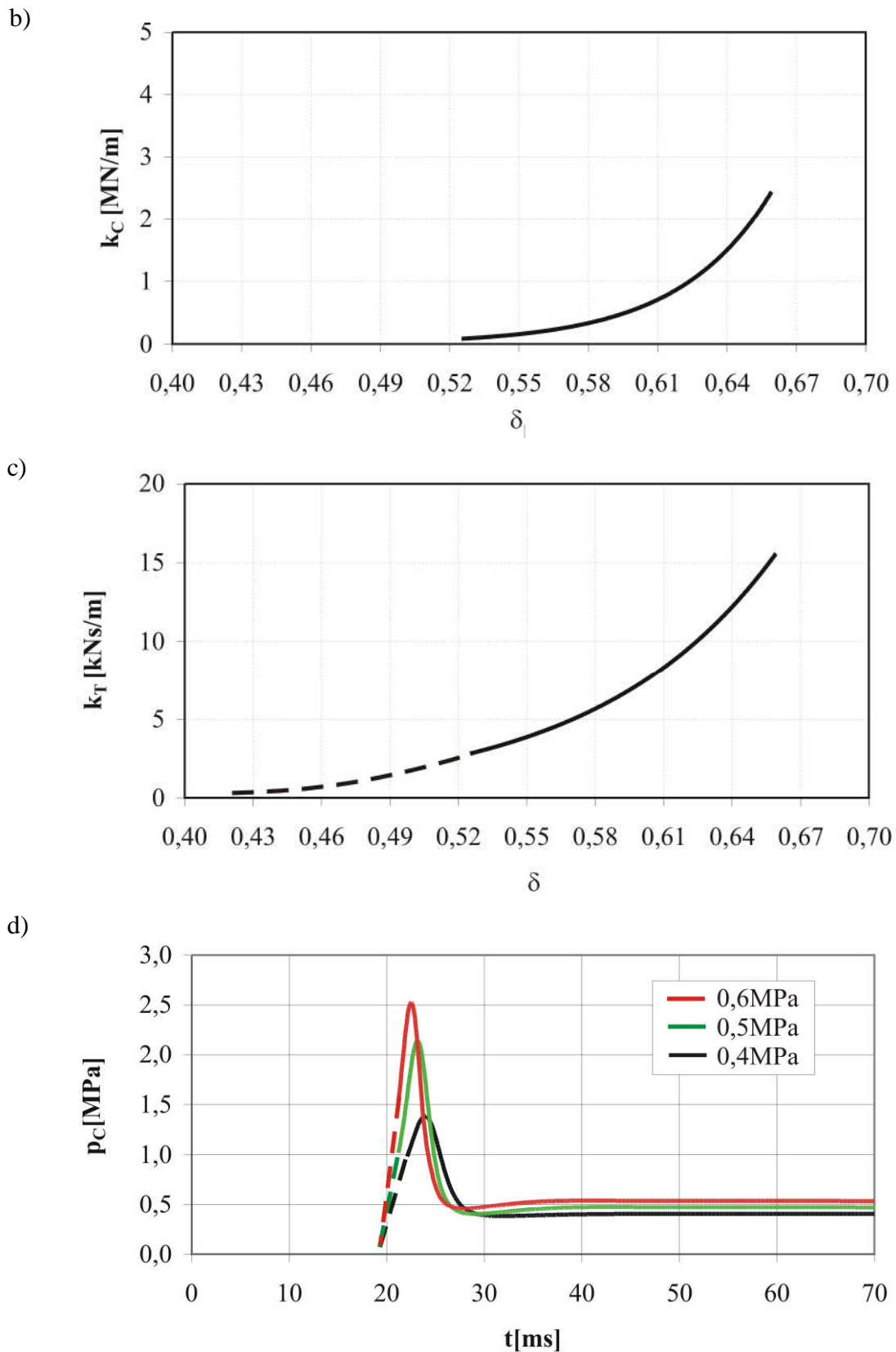
Do rys. 7.3.



Rys.7.3. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=3,19\%$

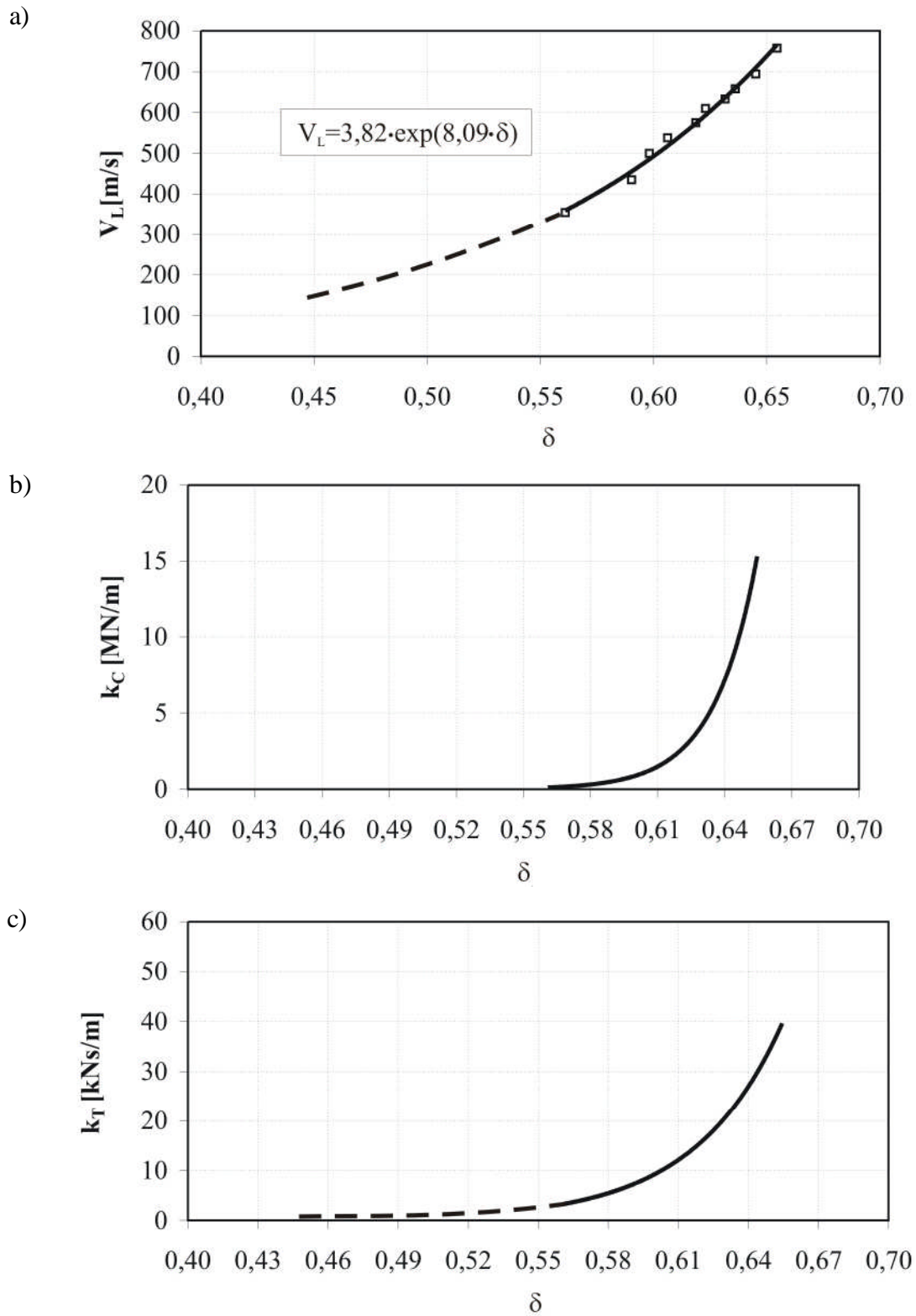


Do rys.7.4.

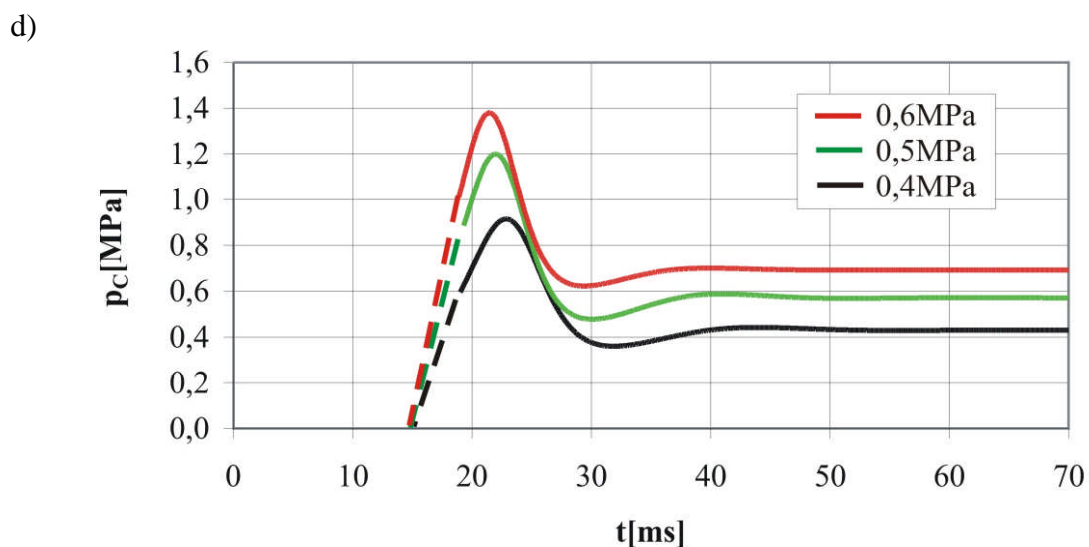


Rys.7.4. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=3,38\%$

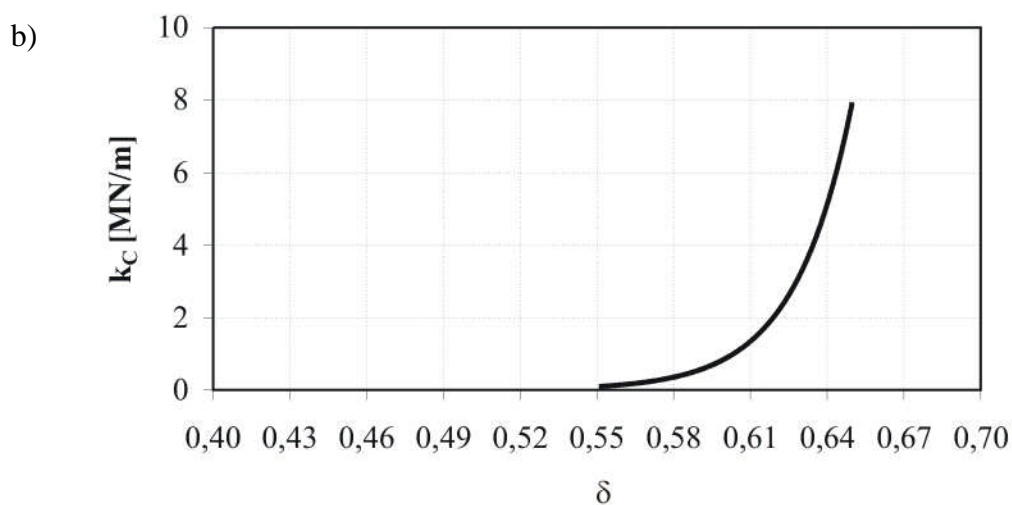
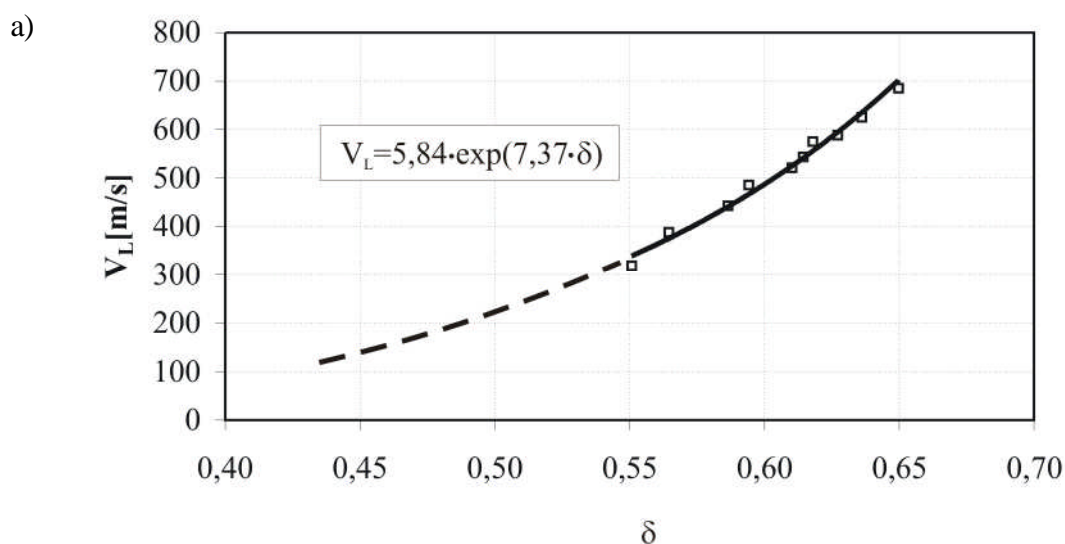
Na rysunkach 7.5-7.8 pokazano wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$, zależności $k_C=f(\delta)$ i $k_T=f(\delta)$ oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa oraz różnych zawartościach wody dla masy nr II.



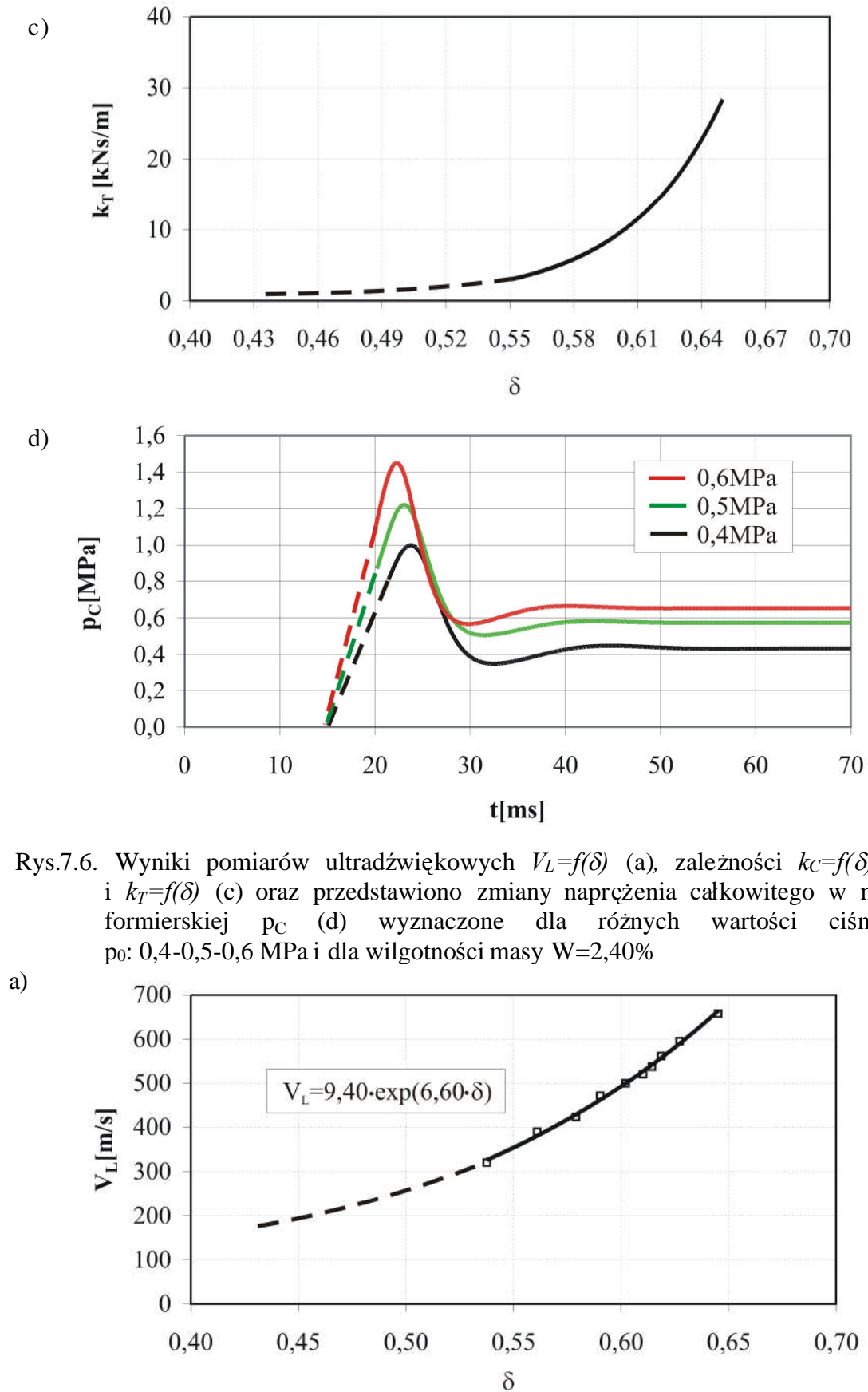
Do rys.7.5.



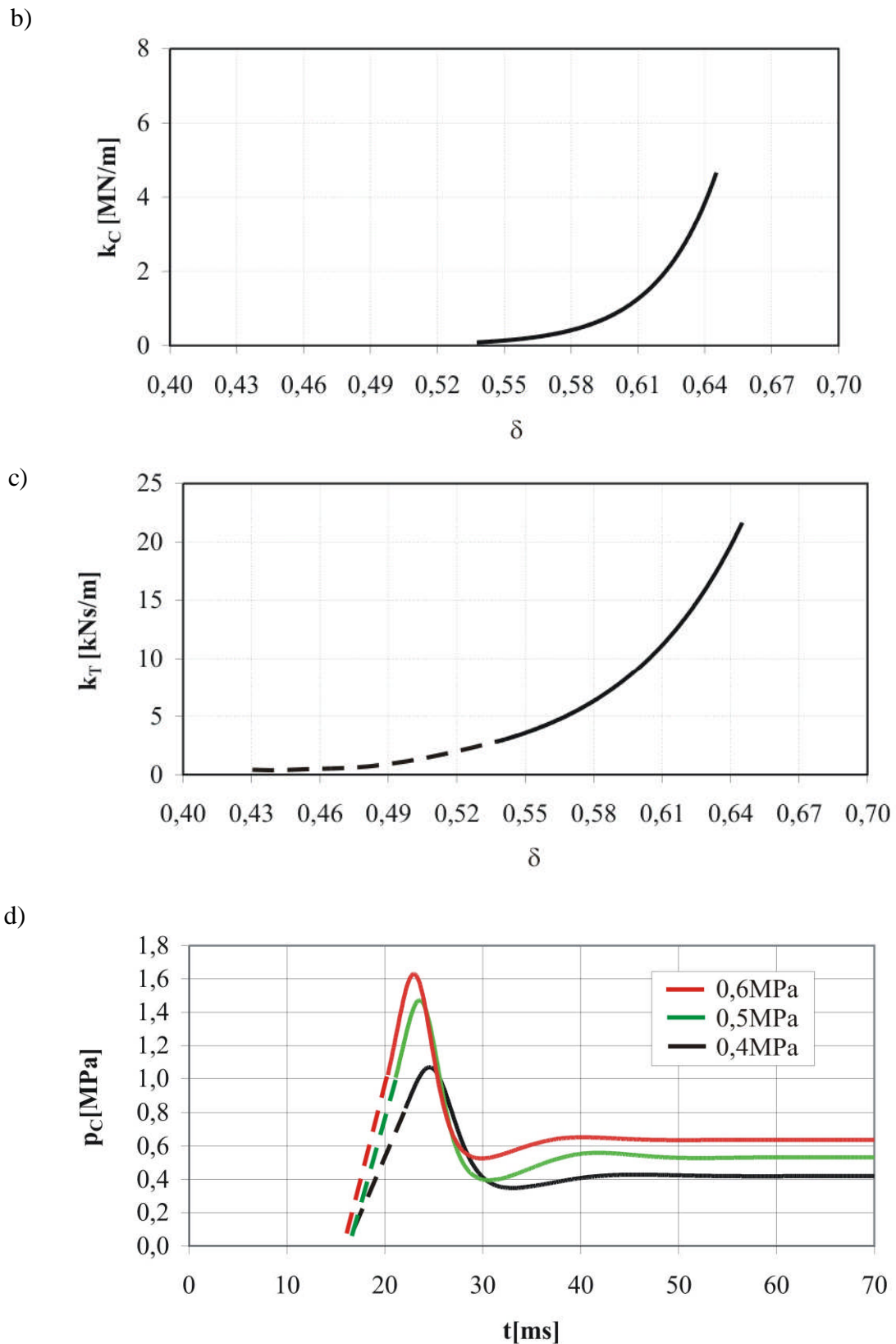
Rys.7.5. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=2,18\%$



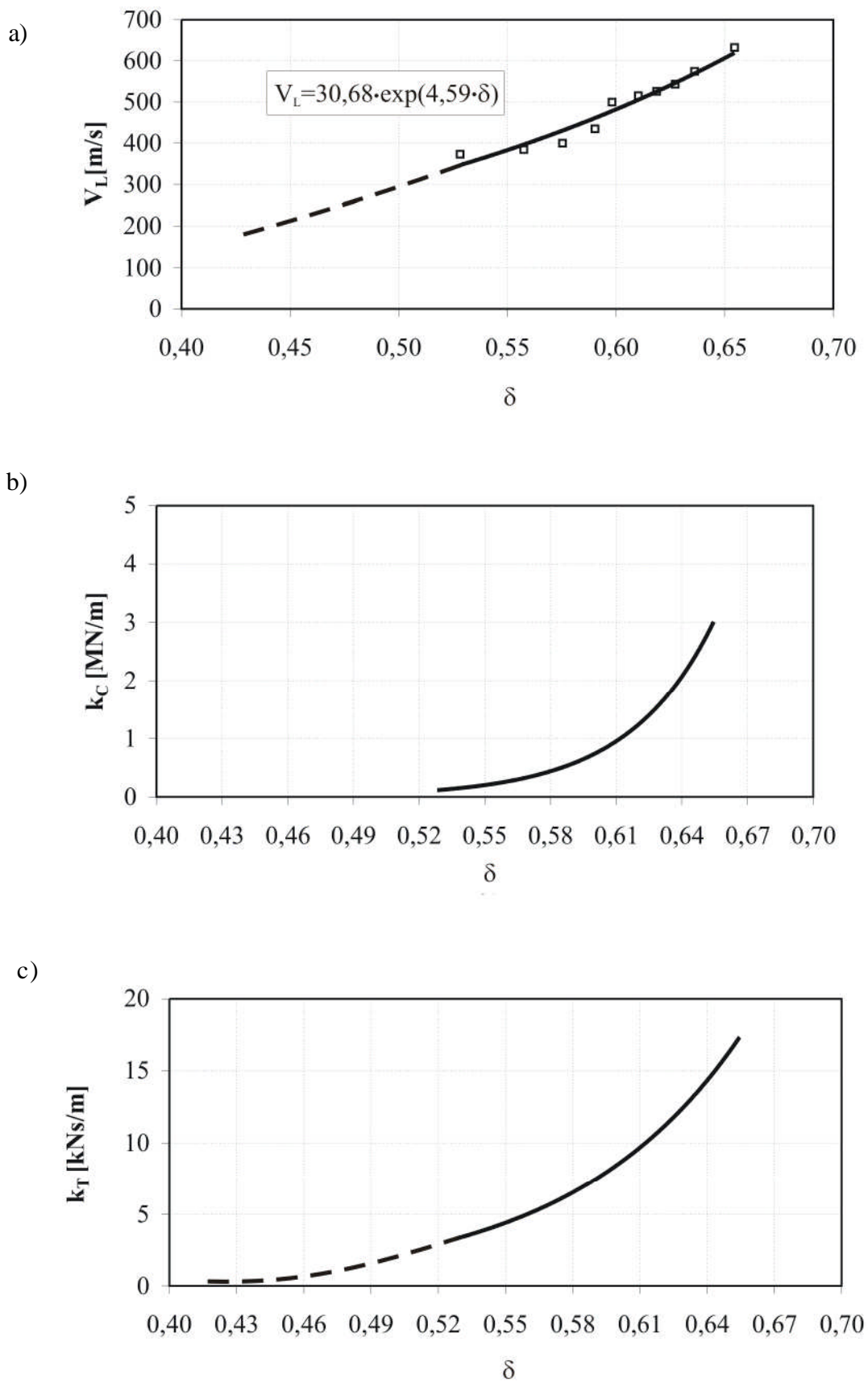
Do rys.7.6.



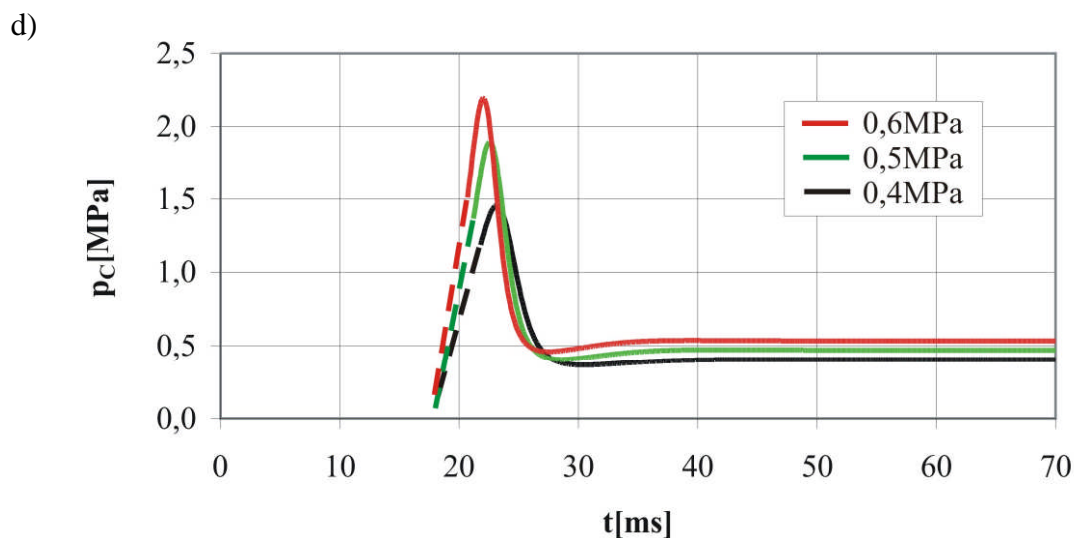
Rys.7.6. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=2,40\%$



Rys. 7.7. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=2,80\%$



Do rys.7.8.

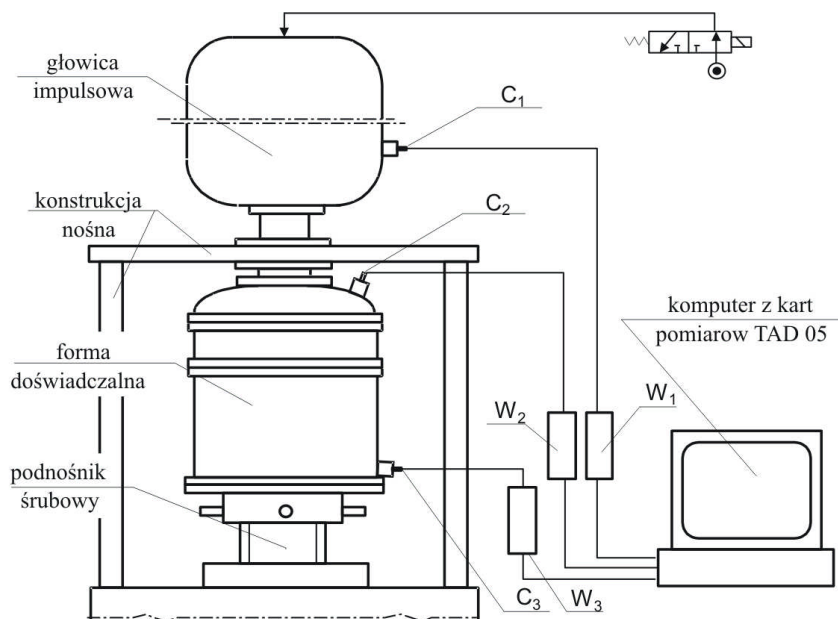


Rys.7.8 Wyniki pomiarów ultradźwiękowych $V_L=f(\delta)$ (a), zależności $k_C=f(\delta)$ (b) i $k_T=f(\delta)$ (c) oraz przedstawiono zmiany naprężenia całkowitego w masie formierskiej p_C (d) wyznaczone dla różnych wartości ciśnienia p_0 : 0,4-0,5-0,6 MPa i dla wilgotności masy $W=3,35\%$

7.2. Badania eksperymentalne dynamiki procesu dynamicznego prasowania mas formierskich

Stanowisko badawcze

Badania eksperymentalne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich zrealizowano na stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 7.9.



Rys. 7.9. Schemat stanowiska badawczego do impulsowego zagęszczania mas formierskich: C_1 , C_2 , C_3 – czujniki ciśnienia typ 601H, W_1 , W_2 , W_3 – wzmacniacze ładunku typ 5001.

Głównymi podzespołami omawianego stanowiska są:

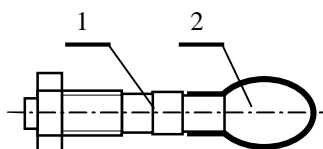
- głowica impulsowa,
- konstrukcja nośna,
- skrzynka formierska z nadstawką,
- podnośnik śrubowy,
- układ do pomiaru szybkozmiennych ciśnień i nacisków.

Podstawowym podzespołem prezentowanego stanowiska jest głowica impulsowa, której badania symulacyjne i eksperymentalne dynamiki opisano w punkcie 6 pracy.

Stanowisko badawcze zostało wyposażone w układ pomiarowy, który (rys. 7.9) umożliwia pomiary wielkości charakteryzujących dynamikę procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. W skład układu pomiarowego wchodzi następujące elementy:

- piezoelektryczne czujniki ciśnień (C_1, C_2) firmy Kistler,
- czujnik do pomiaru nacisków w masie formierskiej (C_3),
- wzmacniacze ładunku typ 5001 (W_i) firmy Kistler,
- komputer PC z kartą pomiarową typ TAD 05 .

Do pomiaru nacisków w warstwach masy formierskiej położonych w pobliżu płyty modelowej nie można było zastosować bezpośrednio czujnika ciśnień, ponieważ tego typu czujniki są przeznaczone do pomiarów ciśnień w ośrodkach ciągłych tj. w cieczech i gazach. Pomiary nacisków w masie formierskiej z użyciem czujnika piezoelektrycznego są możliwe jedynie w przypadku zastosowania elementu pośredniczącego, przekazującego mierzoną wielkość do czujnika. Najlepszym elementem pośredniczącym był element bezinercyjny. Taki warunek spełnia adaptor cieczowy, opracowany w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej. Schemat czujnika piezoelektrycznego wraz z zainstalowanym adaptorem cieczowym przedstawiono na rys. 7.10.



Rys. 7.10. Schemat czujnika do pomiaru nacisków w masie formierskiej: czujnik piezoelektryczny typ 601 H (1), adaptor cieczowy (wodny) (2)

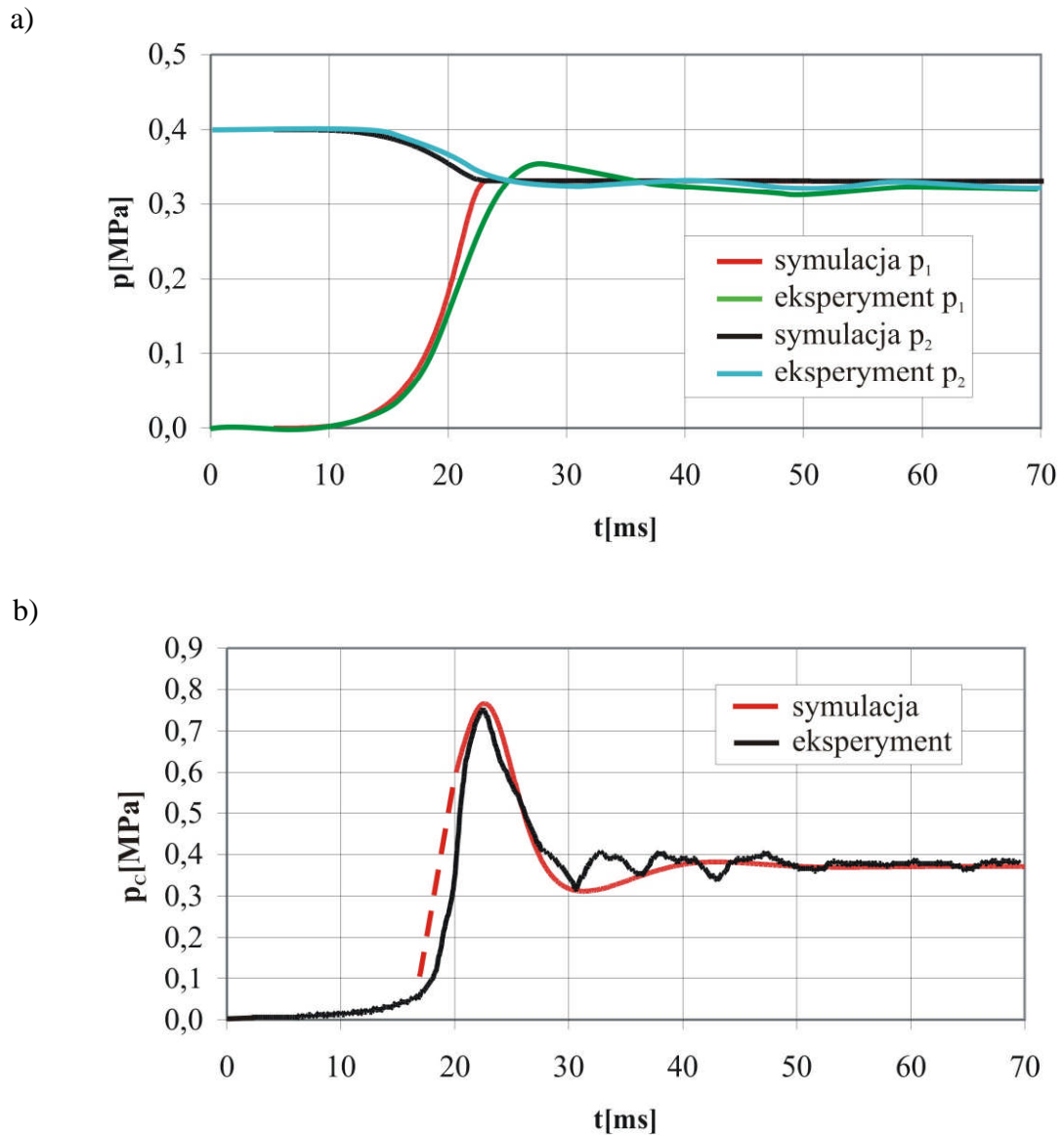
Opracowany adaptor cieczowy umożliwia bezinercyjny pomiar bezkierunkowego ciśnienia wewnątrz masy formierskiej, powstającego podczas procesu dynamicznego jej zagęszczania. W pracy [19] zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych, które potwierdziły skuteczność i celowość stosowania czujników piezoelektrycznych wyposażonych w adaptor cieczowy, do pomiaru nacisków w masach zagęszczanych dynamicznie [40].

Wyniki pomiarów nacisków w warstwach masy położonych w pobliżu płyty modelowej mogą służyć do oceny przebiegu procesu dynamicznego zagęszczania mas formierskich.

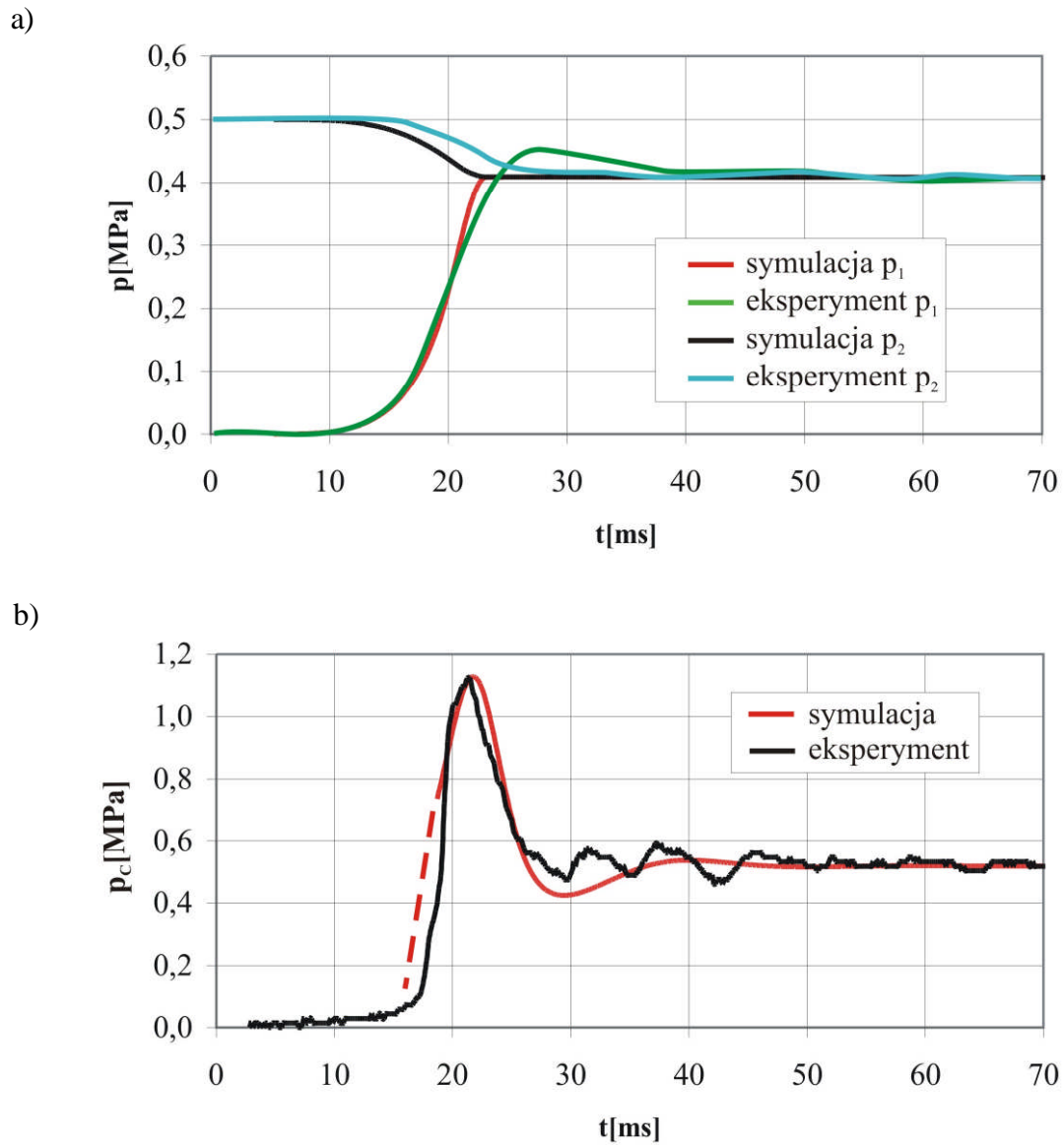
Do badań użyto mas formierskich, o takich samych składach jak w przypadku mas dla których wykonano badania symulacyjne procesu dynamicznego prasowania mas formierskich. Prezentując wyniki badań eksperymentalnych, w celu weryfikacji modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich, zamieszczano równocześnie wyniki badań symulacyjnych.

Na rysunkach 7.11-7.16 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich dla masy nr I.

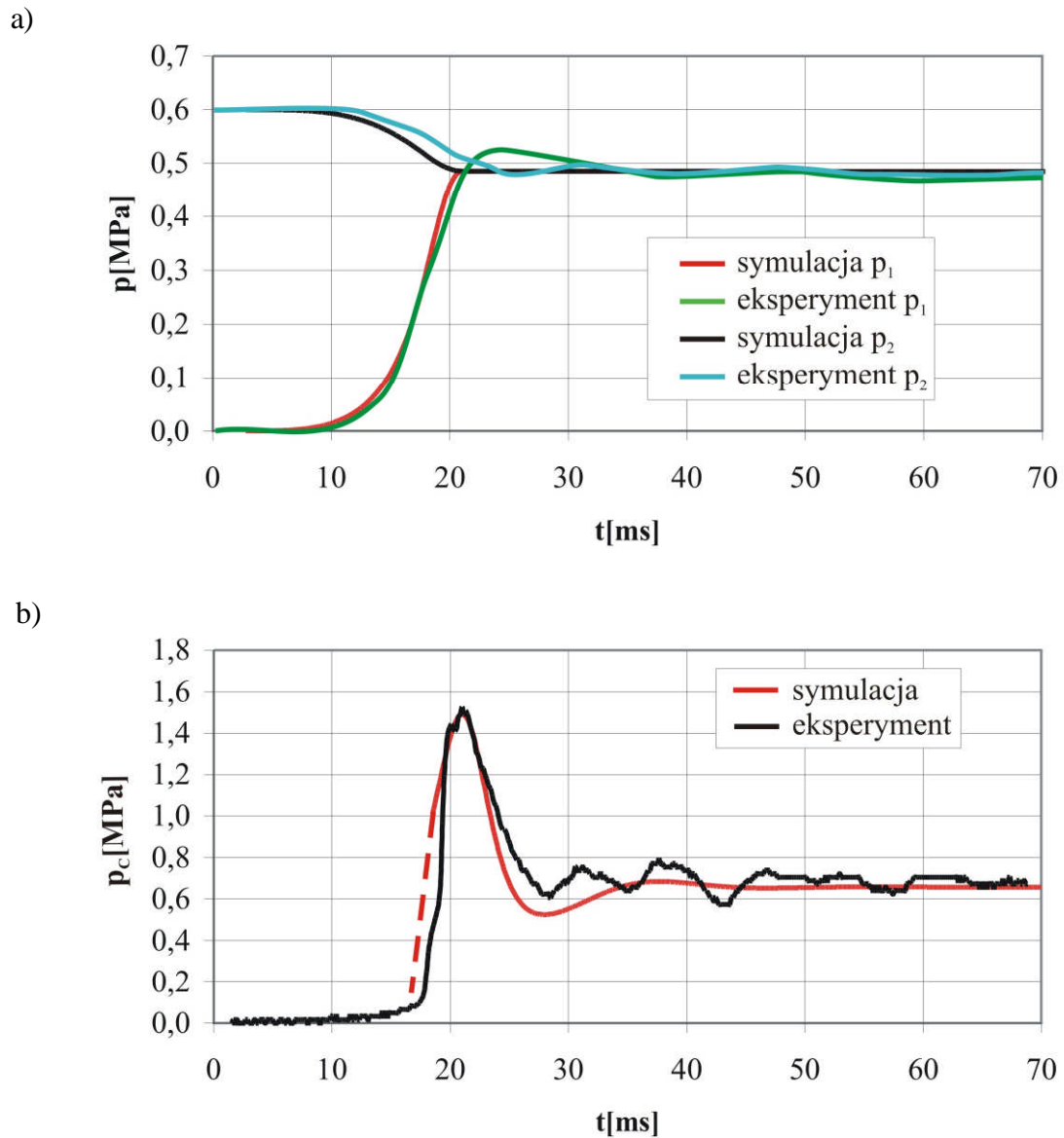
Na rysunkach 7.17-7.22 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich dla masy nr II.



Rys 7.11. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,4$ MPa i wilgotności $W=2,24\%$ masy nr I

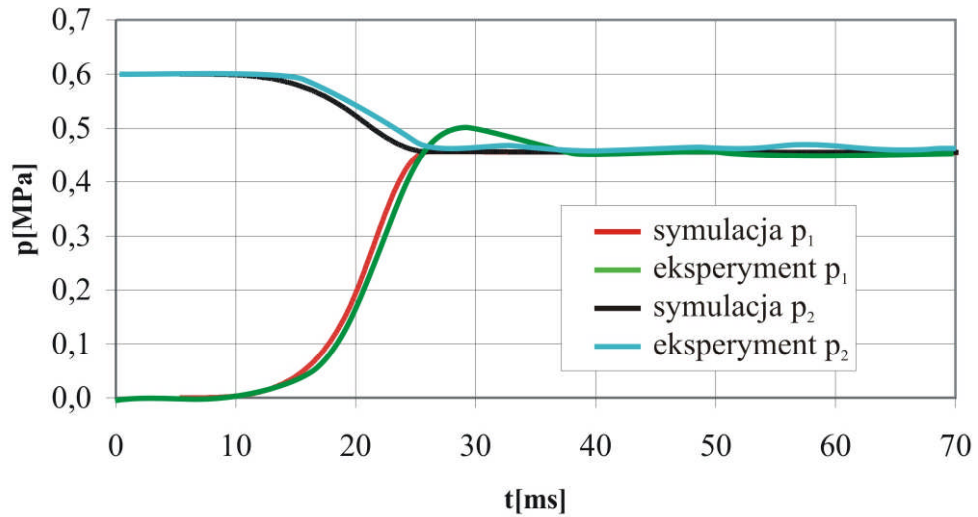


Rys 7.12. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,5$ MPa i wilgotności $W=2,24\%$ masy nr I

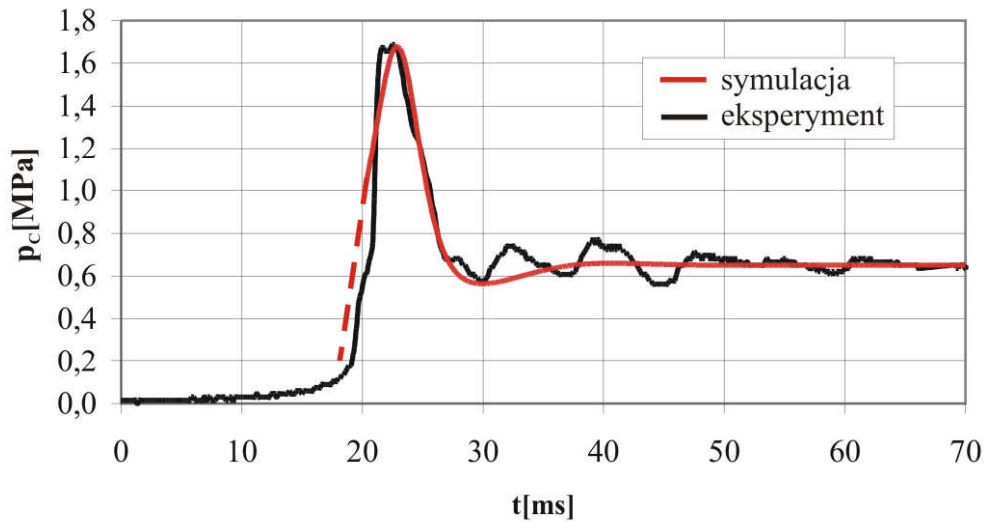


Rys 7.13. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=2,24\%$ masy nr I

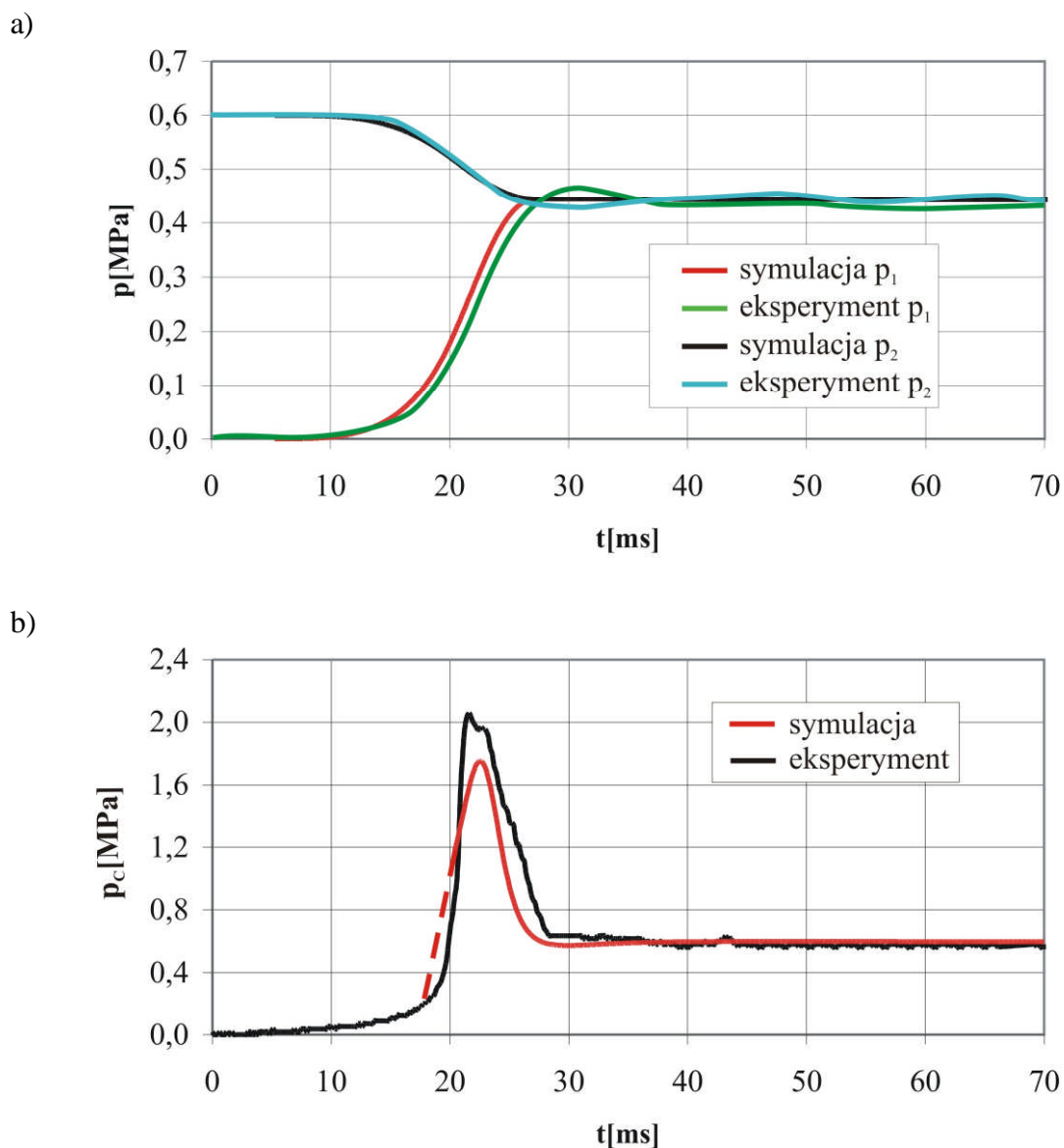
a)



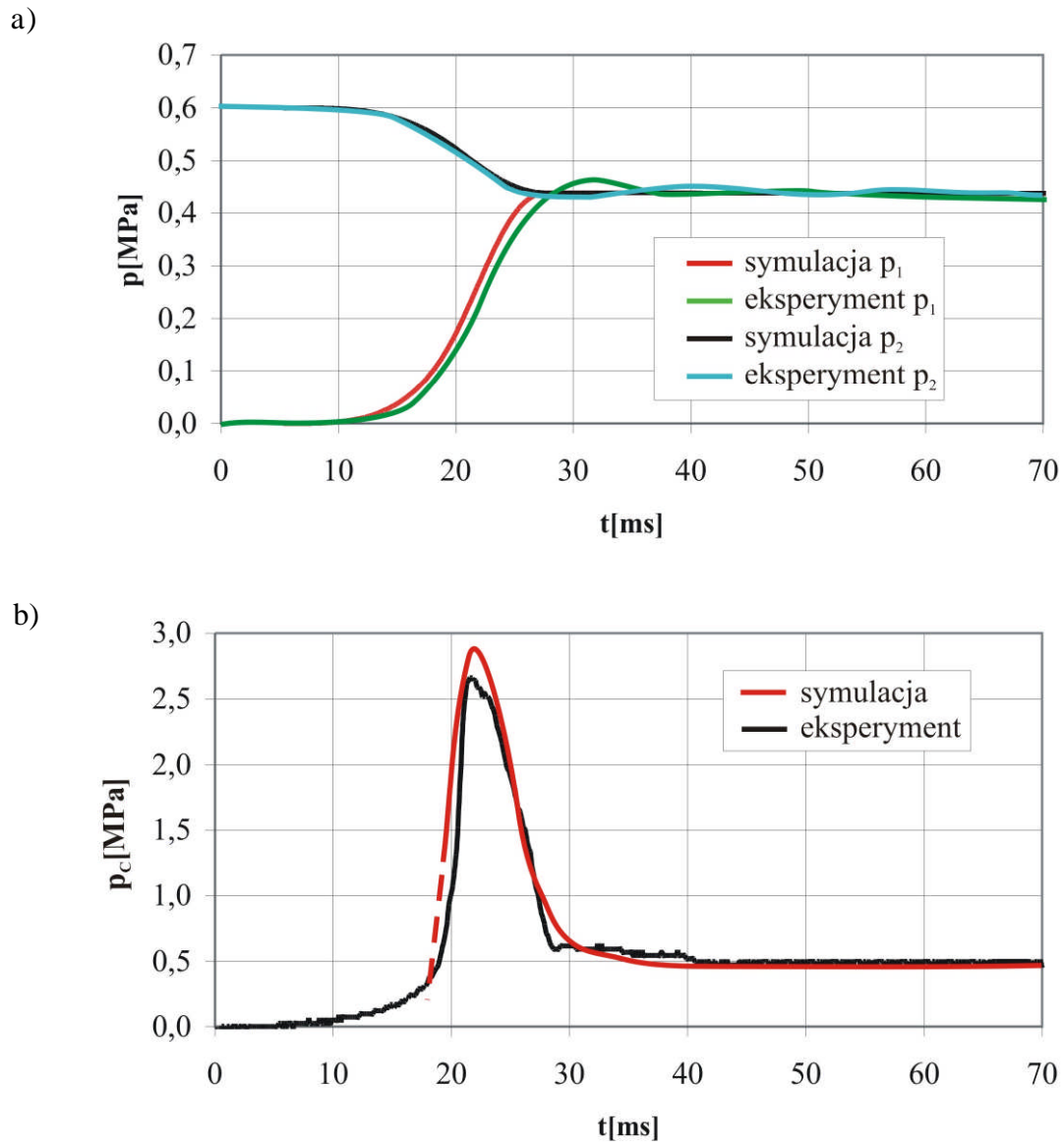
b)



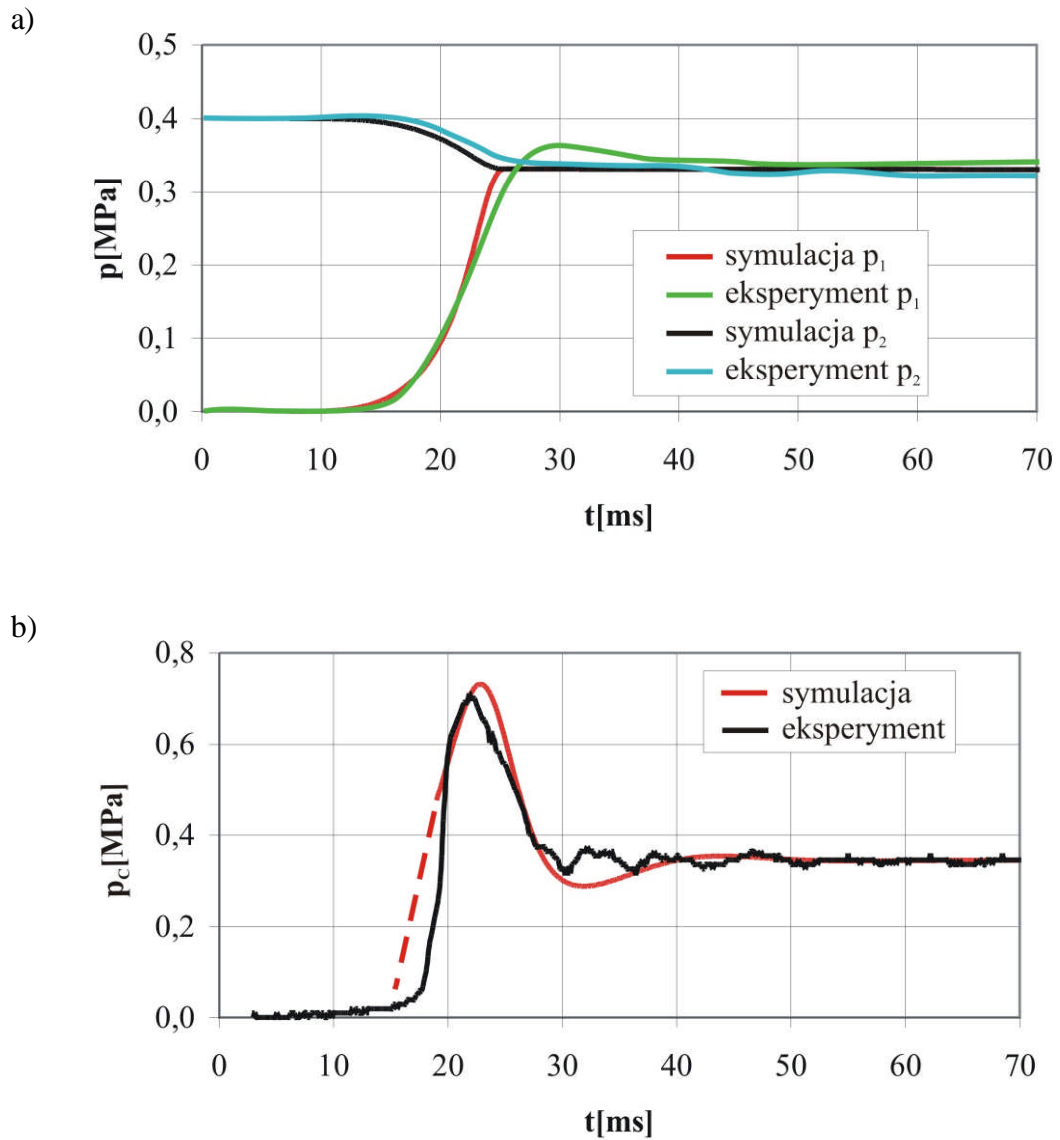
Rys 7.14. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=2,62\%$ masy nr I



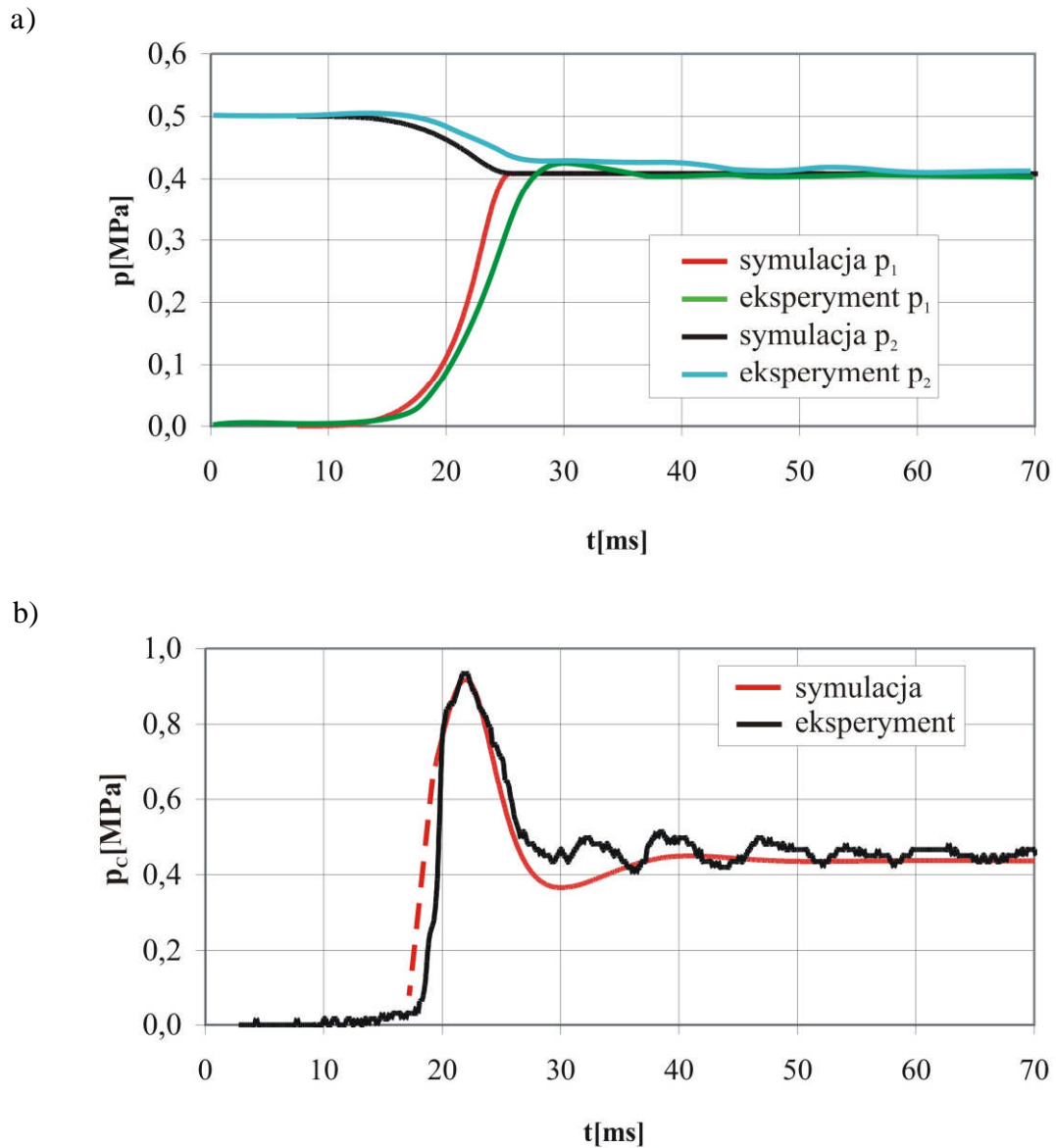
Rys 7.15. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=3,19\%$ masy nr I



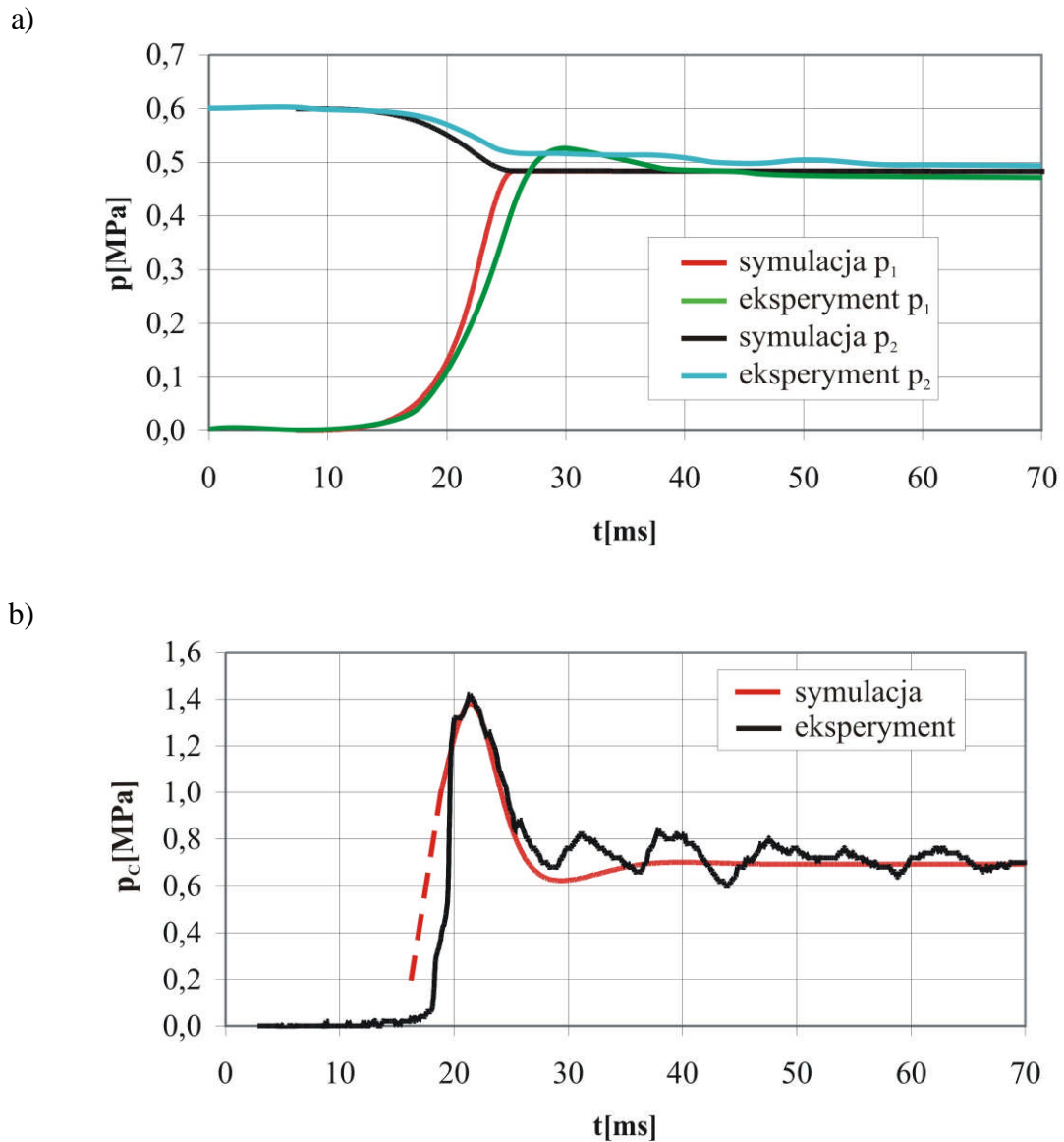
Rys 7.16. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=3,38\%$ masy nr I



Rys 7.17. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,4$ MPa i wilgotności $W=2,18\%$ masy nr II

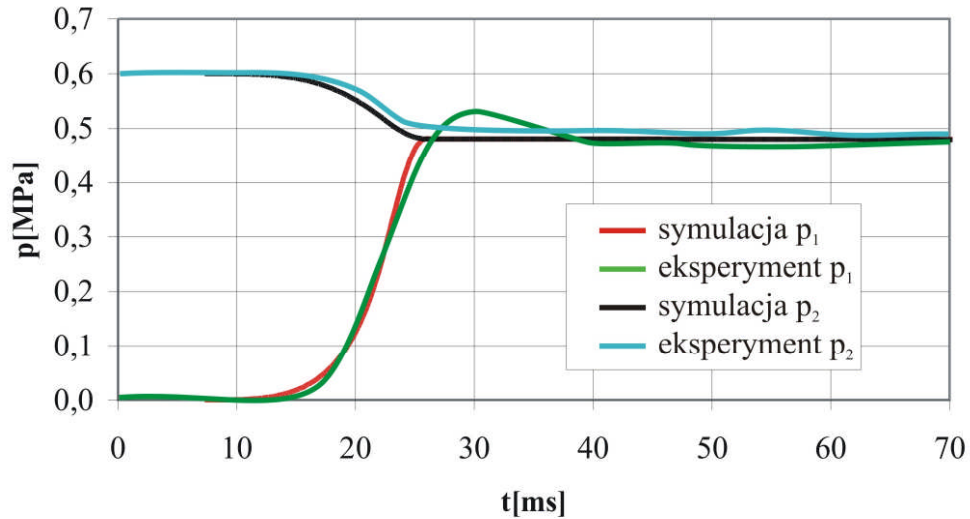


Rys 7.18. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,5$ MPa i wilgotności $W=2,18\%$ masy nr II

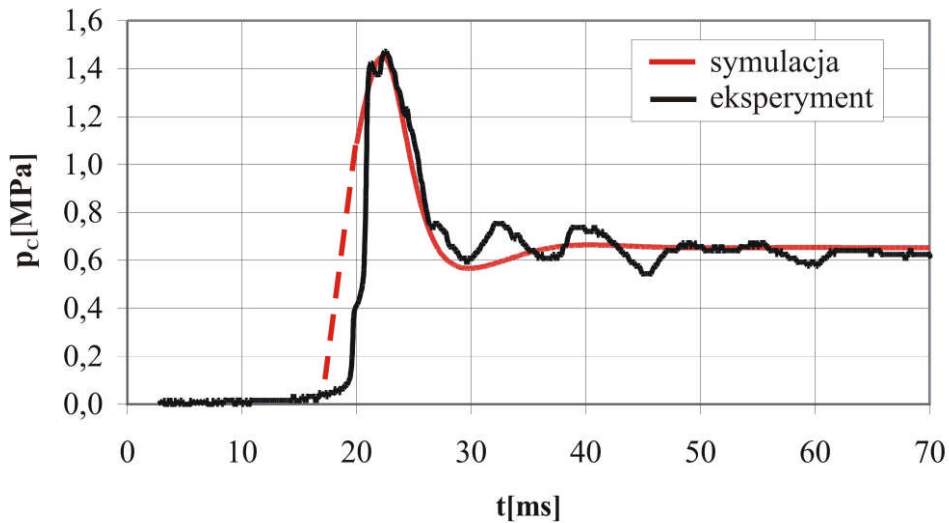


Rys 7.19. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=2,18\%$ masy nr II

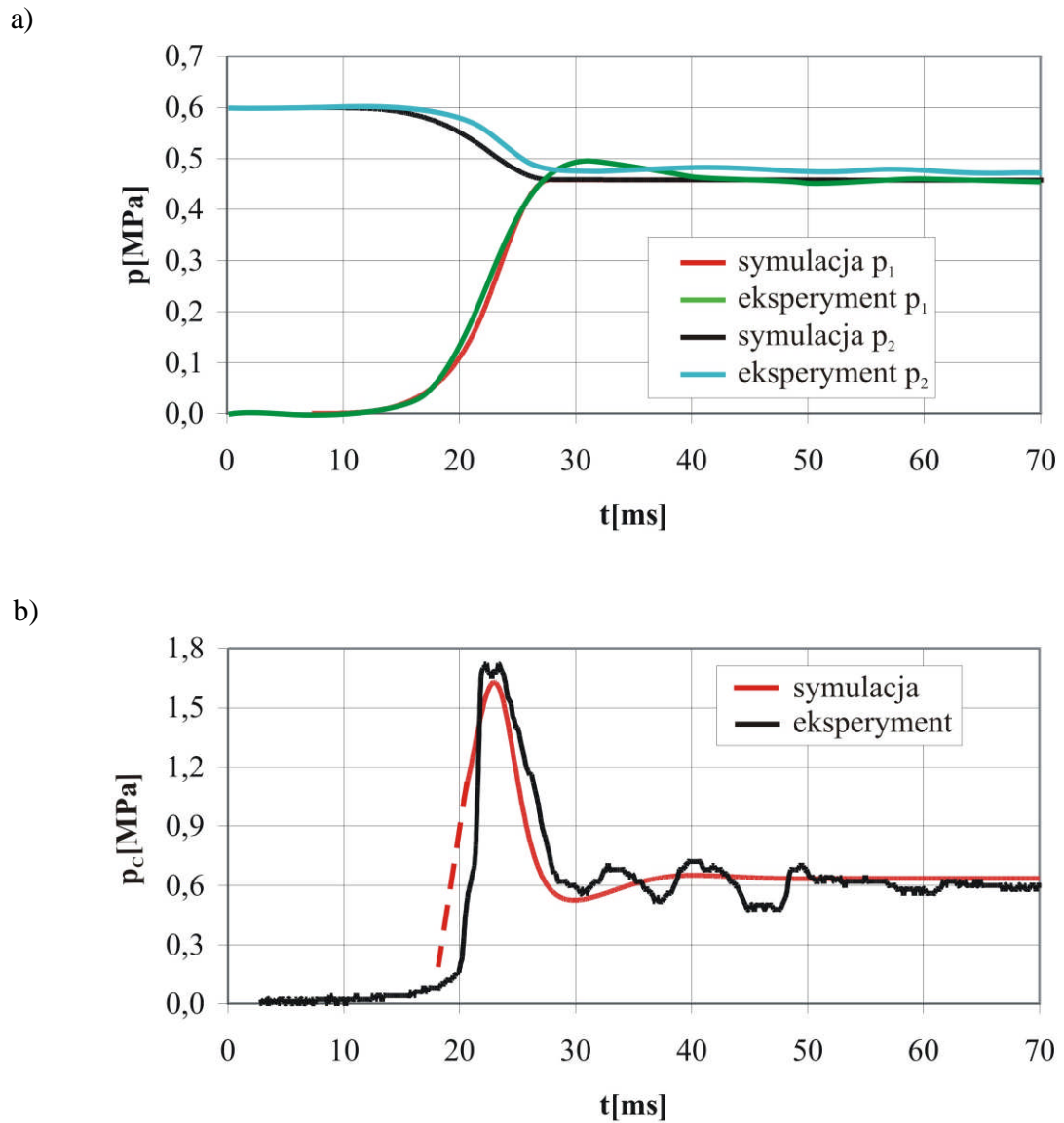
a)



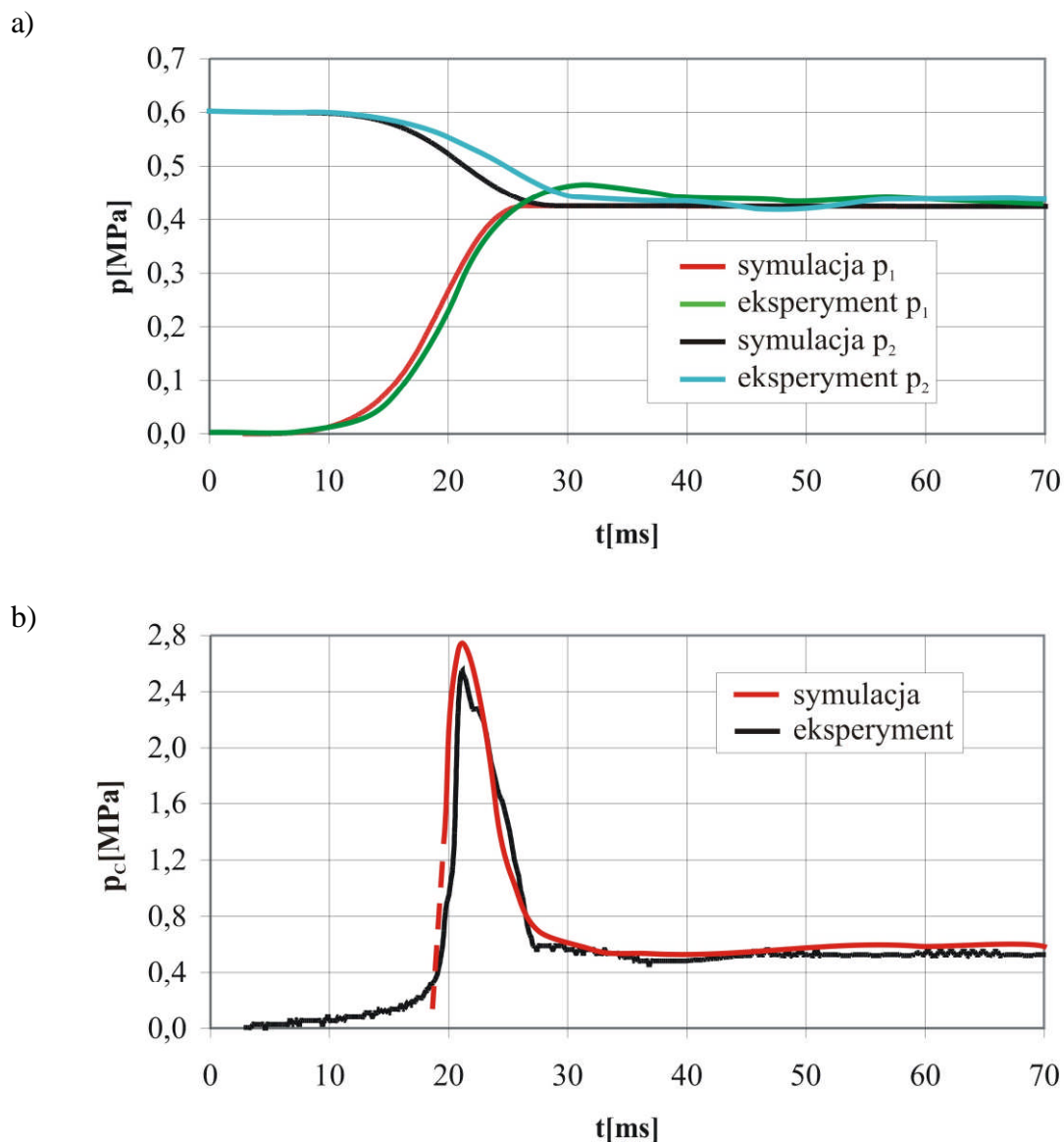
b)



Rys 7.20. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=2,40\%$ masy nr II



Rys 7.21. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=2,80\%$ masy nr II



Rys 7.22. Zależności zmian ciśnień w przestrzeni technologicznej p_1 i w zbiorniku akumulacyjnym p_2 (a) oraz nacisków w masie (b) wyznaczone podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych dla wartości ciśnienia $p_0=0,6$ MPa i wilgotności $W=3,35\%$ masy nr II

7.3. Analiza wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu dynamicznego prasowania mas formierskich

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że własności reologiczne masy formierskiej bardzo dobrze opisuje model lepko-sprężysty. Zależności $k_T(\delta)$ i $k_C(\delta)$, określają zmiany własności lepkich i sprężystych masy podczas jej impulsowego zagęszczania.

Zależności $k_T(\delta)$ i $k_C(\delta)$, można wyznaczyć na podstawie wyników badań eksperymentalnych, które sprowadzają się do pomiarów ultradźwiękowych prędkości fali w funkcji stopnia zagęszczenia masy formierskiej. Zależność $V_L=f(\delta)$ jest wykorzystywana do określenia funkcji aproksymujących współczynniki $k_T(\delta)$ i $k_C(\delta)$. Wykonanie badań ultradźwiękowych masy formierskiej stanowi jedyne wymaganie wstępne do przeprowadzenia badań symulacyjnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich pozwalają na następujące stwierdzenia:

- do opisu procesu odkształcania i zagęszczania masy formierskiej można zastosować lepko-sprężysty model reologiczny masy,
- własności reologiczne masy formierskiej (współczynniki charakteryzujące tarcie lepkie oraz sprężystość) można określić na podstawie ultradźwiękowych badań eksperymentalnych masy,
- do zamodelowania procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich można zastosować opis stanowiący układ równań różniczkowych przedstawiający modele dynamiki:
 - głowicy impulsowej (5.1÷5.4),
 - procesu odkształcania masy formierskiej (5.6),
- opracowany model matematyczny procesu głowicy impulsowej bardzo dobrze opisuje jej dynamikę,
- proces prasowania mas formierskich z użyciem głowicy impulsowej charakteryzuje się bardzo dużą dynamiką – zagęszczenie masy następuje w czasie kilku milisekund,
- na przebieg procesu impulsowego zagęszczania oraz uzyskiwane efekty zagęszczania podstawowy wpływ, poza dynamiką głowicy prasującej, mają własności reologiczne masy formierskiej.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich można stwierdzić, że przyjęty model reologiczny masy oraz opracowany model dynamiki głowicy impulsowej bardzo dobrze opisują dynamikę głowicy i procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

Prezentowane wyniki świadczą o tym, że opracowany model bardzo dobrze opisuje proces impulsowego zagęszczania, zarówno pod względem jakościowym jak

i ilościowym. Należy w tym miejscu podkreślić, że dotychczas nie opracowano modelu, który opisywałby poprawnie impulsowe zagęszczanie mas formierskich chociażby w sposób ilościowy.

Na podstawie wyników badań symulacyjnych opracowanego modelu matematycznego można uzyskać informacje o przebiegu impulsowego zagęszczania masy formierskiej. Podstawową wielkością, charakteryzującą impulsowe zagęszczanie, jest zależność zmian nacisków w masie formierskiej w funkcji czasu. Na podstawie analizy tej zależności można ocenić między innymi:

- dynamikę procesu impulsowego zagęszczania, o czym świadczy czas jego trwania. Uzyskane wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że dynamika procesu jest bardzo duża.
- efekty impulsowego zagęszczania, na podstawie analizy nacisków w masie formierskiej w stanie ustalonym. Umożliwiają one określenie nacisku p_U wynikającego z umocnienia masy, który jest równoważny jej wytrzymałości.

Opracowany model matematyczny można zastosować do projektowania i optymalizacji parametrów i osiągow głowic formierek impulsowych, a także do projektowania i optymalizacji procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

8. WNIOSKI

Wszystkie dotychczas opracowane modele matematyczne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich są niepełne lub zawierają zbyt daleko idące uproszczenia, dlatego żaden z tych modeli nie pozwala na prawidłowy opis przebiegu procesu zagęszczania masy. Dlatego autor rozprawy podjął próbę opracowania modelu matematycznego w pełni opisującego proces impulsowego zagęszczania mas formierskich, modelu który można by stosować w badaniach symulacyjnych.

Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych dynamiki głowicy impulsowej wykazały że przyjęty model matematyczny bardzo dobrze opisuje jej dynamikę. Duża dynamika wewnętrzna głowicy impulsowej jest efektem bardzo dużej dynamiki wewnętrznej samoczynnego, impulsowego zaworu pneumatycznego, który charakteryzuje się bardzo krótkim czasem otwierania zbiornika akumulacyjnego głowicy, a przez to umożliwia uzyskiwanie bardzo dużej szybkości narastania ciśnienia sprężonego powietrza w przestrzeni technologicznej, rzędu kilkuset MPa/s. Opracowany model matematyczny głowicy impulsowej stanowił podstawę do opracowania modelu matematycznego procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich

Impulsowe zagęszczanie mas formierskich, polegające na bezpośrednim zagęszczaniu masy strumieniem sprężonego powietrza, należy rozpatrywać jako dwa ściśle powiązane ze sobą procesy: przepływu sprężonego powietrza z głowicy maszyny formierskiej do przestrzeni technologicznej oraz deformacji i zagęszczania masy formierskiej strumieniem sprężonego powietrza. O charakterze pierwszego procesu decyduje dynamika wewnętrzna głowicy impulsowej. O drugim procesie decydują, poza dynamiką głowicy formierskiej, właściwości fizyczne i reologiczne masy formierskiej.

Do opisu procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej niezbędna jest znajomość jej modelu reologicznego. Masę formierską można zamodelować lepko-sprężystym modelem reologicznym. Wówczas jej własności lepkie i sprężyste określają współczynniki $k_T(\delta)$ i $k_C(\delta)$.

Zależności $k_T(\delta)$ i $k_C(\delta)$ można wyznaczyć na podstawie wyników badań eksperymentalnych, które sprowadzają się do pomiarów ultradźwiękowych prędkości fali w funkcji stopnia zagęszczenia masy formierskiej. Zależność $V_L=f(\delta)$ jest wykorzystywana do określenia funkcji aproksymujących współczynniki $k_T(\delta)$ i $k_C(\delta)$.

Wykonanie badań ultradźwiękowych masy formierskiej stanowi jedyne wymaganie wstępne lecz konieczne do przeprowadzenia badań symulacyjnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. Metoda ultradźwiękowego pomiaru właściwości mas, została po raz pierwszy opracowana przez Z. Samsonowicza i rozwinięta przez T. Mikulczyńskiego [44][52].

Zatem do matematycznego zamodelowania procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich zastosowano:

- model dynamiki głowicy impulsowej,
- model reologiczny masy formierskiej, określony na podstawie identyfikacji eksperymentalnej.

Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich można stwierdzić, że została udowodniona TEZA pracy.

Zaprezentowane w pracy wyniki badań świadczą o tym, że opracowany model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania masy formierskiej bardzo dobrze opisuje jego dynamikę, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. Ponadto należy podkreślić, że jest to pierwszy i jedyny model, który w pełni opisuje proces impulsowego zagęszczania i umożliwia realizację badań symulacyjnych tego procesu.

Poniżej przedstawiono wnioski końcowe pracy:

a) Wnioski poznawcze

- Zamodelowanie matematyczne procesu impulsowego zagęszczania masy formierskiej wymaga znajomości jej modelu reologicznego. Masę można opisać lepko-sprężystym modelem reologicznym, którego parametry można wyznaczyć na podstawie wyników badań ultradźwiękowych masy formierskiej.
- Znajomość wyników badań ultradźwiękowych, które pozwalają na określenie zależności $V_L=f(\delta)$, stanowi jedyny warunek wstępny do realizacji badań symulacyjnych opracowanego modelu impulsowego zagęszczania mas formierskich.
- Model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich stanowi:
 - model procesu deformacji i zagęszczania masy formierskiej,

- model dynamiki głowicy impulsowej.
- Opracowany model matematyczny bardzo dobrze opisuje proces impulsowego zagęszczania masy, zarówno w sensie ilościowym jak i jakościowym.
- Decydujący wpływ na efekty impulsowego zagęszczania masy wywiera dynamika głowicy impulsowej. Decyduje ona o osiąganiu dużych szybkości deformacji masy i w efekcie umożliwia uzyskanie wysokiego stopnia zagęszczenia masy formierskiej.
- Przebieg procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich można ocenić na podstawie zależności $p_c=f(t)$. Zależność tą można stosować do oceny wytrzymałości masy formierskiej po zagęszczeniu.

b) Wnioski użyteczne

- Konstrukcja samoczynnego zaworu impulsowego oraz zasada jego działania, zapewniając bardzo krótki czas otwierania i dużą wydajność, umożliwiają jego zastosowanie jako zaworu głowicy impulsowej.
- Opracowany model matematyczny procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich może być zastosowany do:
 - doboru parametrów konstrukcyjnych i warunków pracy głowic impulsowych maszyn formierskich,
 - doboru parametrów impulsowego zagęszczania mas formierskich,
 - optymalizacji parametrów konstrukcyjnych głowic impulsowych maszyn formierskich,
 - optymalizacji parametrów procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich.

LITERATURA

- [1] Ankudowicz B., Bogdanowicz J., Ganczarek M., Mikulczyński T., Więclawek R.: Wybrane metody dynamicznego zagęszczania mas formierskich. W: Nowoczesność – odlewnictwo – ekologia. II Sympozjum naukowo-techniczne. Szklarska Poręba, 22-23 październik 1999. Wrocław: Silesia 1999
- [2] Barycki J., Ganczarek M., Mikulczyński T., Samsonowicz Z.: Dynamiczne zagęszczanie mas formierskich. *Pneumatyka* 2000, nr 6
- [3] Barycki J., Kollek W., Mikulczyński T., Nowak D.: Modelowanie dynamiki jednozaworowej głowicy impulsowej. *Pneumatyka* 2004, nr 3. Referat z XIV Krajowej Konferencji PNEUMA 2004. Poznań, 14-17 czerwca 2004
- [4] Bast J., Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen der pneumatischen Verdichtungsverfahren, *Giessereiforschung* 45, 1993, Nr. 1
- [5] Bogdanowicz J.: Impulsowe zagęszczanie mas formierskich. Badania skuteczności formowania głowicą impulsową z samoczynnym zaworem impulsowy – Praca doktorska. ITMiA PWr. Wrocław 1999
- [6] Chrást J.: Stroje a zarizeni na vyrobu forem z bentonitove smesi. *Slevarenstvi* 1999 cis. 10
- [7] Cibizov V.F., Pokrovskij V.J., Rusakov T.T., Meseriakov P.N., Tieriesin J.P.: Uplotnienije pieščano-glinistych form vozduchom setevogo davlenija, *Lit. Proizv.*, 1989, nr 3
- [8] Damm N., Solis M., Griese D.: Modernisierung einer Maschinenformerei unter Einsatz des Formverfahrens mit dynamischer Impulsverdichtung, *Giesserei* 80, 1993, Nr. 9
- [9] Dańko J.: Nowoczesne wyposażenie maszynowe warunkiem rozwoju polskich odlewni, *Przegląd Odlewnictwa* 1998, nr 9
- [10] Domżał R., Mikulczyński T., Samsonowicz Z., Stawczyk R.: Nowa jednozaworowa głowica impulsowa. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* vol. 17, 1997, nr 1
- [11] Fedoryszyn A., Smyksy K., Dańko J.: Techniki formowania stosowane w odlewnictwie światowym, II Konferencja Odlewnicza Technical '99, Nowa Sól 31.05 – 02.06.1999
- [12] Ganczarek M.: Model matematyczny procesu dynamicznego prasowania mas formierskich, Praca doktorska, Raporty ITMiA PWr Wrocław, 2003 Ser. PRE Nr 3
- [13] Ganczarek M., Kollek W., Mikulczyński T.: Badania symulacyjne i eksperymentalne procesu dynamicznego prasowania mas formierskich. *Arch. Odlew.* 2002, R. 2, nr 6
- [14] Ganczarek M., Mikulczyński T., Nowak D., Samsonowicz Z.: Wpływ filtracji na proces impulsowego zagęszczania mas formierskich. *Prz. Odlew.* t. 53, 2003 nr 3

-
- [15] Ganczarek M., Mikulczyński T., Nowak D., Samsonowicz Z.: Ocena skuteczności dynamicznego prasowania mas formierskich. Mater. Inż. 2003 Roc. 10 cis.
- [16] Ganczarek M., Mikulczyński T., Nowak D., Samsonowicz Z.: Ocena skuteczności dynamicznego prasowania mas formierskich. Prz. Odlew. t. 54 nr 4, 2004
- [17] Ganczarek M., Mikulczyński T., Nowak D., Samsonowicz Z.: Nowoczesne maszyny formierskie w automatycznych liniach odlewniczych. W: Technologia i organizacja produkcji seryjnej. Zbiór artykułów pod red. Mieczysława Korzyńskiego. Rzeszów: PRzesz. 2003 Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej
- [18] Ganczarek M., Mikulczyński T., Samsonowicz Z., Więclawek R.: Modelovani reologických vlastnosti formovací směsi. Slevarenství, Roc. 50, 2002, cis. 11/12
- [19] Ganczarek M., Mikulczyński T., Samsonowicz Z.: Pomiary nacisków w masach zagęszczanych dynamicznie. Prz. Odlew., t. 51, 2001, nr 3
- [20] Gerc E. W.: Dynamika pnevmatičeskich sistem mašin. Mašinostrojenije, Moskva 1985
- [21] Gregoraszcuk M.: Nowoczesne rozwiązania w mechanizacji formowania, Materiały I Krajowej Konferencji Naukowej – Materiałoznawstwo, Odlewnictwo, Jakość. Wyd. PKr. Kraków 1997
- [22] Heinrich M., Schmidt J., Pecher Ch., Fleischer H.: Erste Ergebnisse mit der Luftimpulsverdichtung im VEB GISAG, Stammbetrieb. Giessereitechnik 1987, z.12
- [23] Hengler K., Sindermann H.: Neue Formanlage für Hinterachsbrücken bei Mercedes-Benz, Giesserei 81, 1994, Nr. 1
- [24] Iwaszko J., Matyas J., Stawczyk R.: Wstępne badania skuteczności działania armatki powietrznej. Materiały naukowe niepublikowane – XI Krajowej Konferencji PNEUMA`98. Koszalin-Mielno 1998
- [25] Iwaszko J., Stawczyk R.: Dynamika wewnętrzna armatki powietrznej. Materiały naukowe niepublikowane - VIII Krajowej Konferencji PNEUMA`95. Kielce 1995
- [26] Iwaszko J.: Model matematyczny armatki powietrznej i wstępne badania doświadczalne. Opracowanie wykonane na zlecenie O.B-R. Elementów i Układów Pneumatyki Kielce (niepublikowane). Warszawa, sierpień 1995
- [27] Kollek W., Mikulczyński T., Nowak D.: Badania symulacyjne procesu impulsowego zagęszczania mas formierskich. W: Odlewnictwo XXI wieku - technologie, maszyny i urządzenia odlewnicze. VI Konferencja Odlewnicza Technical 2003. Biuletyn konferencyjny. Wydział Odlewnictwa AGH w Krakowie. Nowa Sól, 29.05-30.05.2003.

-
- [28] Kollek W., Mikulczyński T., Naplocha K., Nowak D.: Zastosowanie metody ultradźwiękowej do oceny parametrów modelu reologicznego mas formierskich. Arch. Odlew. 2004 R. nr 4
- [29] Kollek W., Mikulczyński T., Nowak D., Samsonowicz Z.: Simulation research in impulse compacting of mouldings sands. Arch. Civ. Mech. Eng. 2004 vol. 4 nr 2
- [30] Kollek W., Mikulczyński T., Nowak D., Samsonowicz Z.: Impulsowe zagęszczanie mas formierskich. W: 73 Posiedzenie Sekcji [Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN]. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 21-22 X 2004. z. 73. Oficyna Wydaw. PWroc., Wrocław 2004
- [31] Kollek W., Mikulczyński T., Nowak D., Więclawek R.: Eksperymentalna identyfikacja modelu reologicznego ośrodka rozdrobnionego. Arch. Odlew. R. 4 2004, nr 11
- [32] Korotčenko A., J.: Tendenci razvitja sposobov izgotovljenija razovych form iz syrych piesčano – glinistnych smiesej, Lit. Proizv., 1994, nr 9
- [33] Krempe H.: Das Impact-Multi-System – Processtechnologie und Anwendung, CIATF Technical Forum, Vorträge, Düsseldorf 1999
- [34] Matviejenko I.W.: Impulsnoje i impulsno-ekstpuzonnoje uplotnienije form i stieržniej, Lit. Proizv., 2001, nr 9
- [35] Matviejenko I.W.: Isljedovanije impulsnych procesov formoobrazovanija. Lit. Proizv., 1993, nr 10
- [36] Mikulczyński T., Ganczarek M., Bogdanowicz J.: Wpływ składu masy formierskiej na skuteczność zagęszczania impulsowego. W: Zapewnienie jakości w odlewnictwie. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa Odlewnictwo 2000. Wrocław-Polanica Zdrój, 24-26 maja 2000. Katowice [i in.]: Komisja Odlewnictwa Katow. Oddz. PAN 2000, (Krzepnięcie Metali i Stopów, ISSN 0208-9396; nr 43)
- [37] Mikulczyński T., Ganczarek M.: Dynamiczne prasowanie mas formierskich. W: III Polski Kongres Odlewnictwa. Zbiór materiałów. [Prodlew Warszawa, Zakład Odlewnictwa PWarsz., STOP Oddział Warsz.]. Warszawa, 13-14 październik 2000
- [38] Mikulczyński T., Nowak D., Nowicki J.: Modelirovanie processa impulsnogo uplotnienija formovočnych smesej. Litejnoe Proizv. 2003 nr 12
- [39] Mikulczyński T., Nowak D., Nowicki J.: Reologiceskie svojstva formovocnoj smesi. Własności reologiczne masy formierskiej. Litejscik Ross. 2005 nr 3
- [40] Mikulczyński T., Nowak D., Więclawek R.: Pomiary ciśnień dynamicznych w ośrodkach ciągłych i rozdrobnionych. W: Automatyizacja - nowości i perspektywy. Automation 2005. Konferencja naukowo-techniczna. [Zbiór referatów]. Warszawa, 6-8 kwietnia 2005. [Warszawa: PIAP 2005]

-
- [41] Mikulczyński T., Ganczarek M.: Modelirovanie processa dinamičeskogo pressovanija formovočnych smesej. W: Progressivnye tehnologičeskie processy i oborudovanie v litejnom proizvodstve. Sbornik naučnych trudov meždunarodnoj naučno-techničeskoj konferencii. Moskva, 3-4 grudnia 2002. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Techničeskogo Universiteta MAMI
- [42] Mikulczyński T., Ganczarek M.: Wybrane metody dynamicznego zagęszczania mas formierskich. Arch. Technol. Masz. Autom., vol. 20, 2000, nr 1
- [43] Mikulczyński T., Samsonowicz Z., Bogdanowicz J., Ganczarek M., Ankudowicz B.: Nowa głowica do dynamicznego prasowania mas formierskich. W: Tendencje rozwojowe w mechanizacji procesów odlewniczych. II Konferencja. Kraków, 25-26 listopada 1999. Wydział Odlewnictwa AGH, Kraków 1999
- [44] Mikulczyński T.: Zastosowanie metody ultradźwiękowej do badania mas i materiałów formierskich, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej nr 54, Seria: Monografie nr 15, Wrocław 1994
- [45] Mrożek B., Mrożek Z.: Matlab. Uniwersalne środowisko do obliczeń naukowo-technicznych, Wydawnictwo PLJ, Warszawa 1996
- [46] Müller G.: Technische Umschau. Formstoffverdichtung mit Luftimpuls – Ergebnisse aus der Praxis, Giesserei 77, 1990, Nr. 4
- [47] Orlov G.M, Blagonravov B. P.: Miechanizm impulsnogo uplotnienija. Lit. Proizv. 1992, nr 10
- [48] Orlov G.M.: Matematičeskoje modelirovanije procesa impulsnogo uplotnienija form. Lit. Proizv. 1985, nr 11
- [49] Orlov G.M.: Miechanizm dinamičeskogo uplotnienija form. Lit. Proizv. 1983, nr 7
- [50] Orłowicz W., Zastosowanie ultradźwięków w odlewnictwie, Krzepnięcie Metali i Stopów, 2000, rocznik 2, Nr 45, PAN Katowice
- [51] Pobuzbikov A.F.: Impulsnaja formovka vozduchom nizkogo davlenija, Lit. Proizv., 1994, nr 9
- [52] Samsonowicz Z.: Ultradźwięki w pomiarach wilgotności mas formierskich, Przegląd Odlewnictwa, nr 5, 1969.
- [53] Schaarschmidt E., Tillmanns H.: Entwicklung der Impulsverdichtung tongebundener Formstoffe, Giesserei 76, 1989, Nr. 4
- [54] Smoluchowska E., Izdebska-Szanda I., Kierunki rozwoju wybranych technologii odlewniczych, Przegląd Odlewnictwa 2001, nr 11
- [55] Smyksy K.: Analiza odmian formowania impulsowego, II Konferencja Tendencje Rozwojowe w Mechanizacji Procesów Odlewniczych, Kraków 25-26.11.1999

-
- [56] Smyksy K.: Badania i analiza parametrów impulsowej maszyny formierskiej – Praca doktorska. ITiMO AGH. Kraków 1991
- [57] Smyksy K.: Uwagi o procesie przepływu powietrza w impulsowych maszynach formierskich. Research – Development – Production of foundry, 1st International Scientific Conference, Herl’any – Košice. Acta Metallurgica Slovaca 2/1998. Slovak Republic, 1998.
- [58] Śliwiński A.: Ultradźwięki i ich zastosowania. WNT, Warszawa 2001
- [59] Tilmanns H., Dietz A., Weber F., Bast J., Renker D.: Untersuchungen und mathematische Modellierung zur pneumatischen Verdichtung tongebundener Formstoffe, CIATF Technical Forum, Vorträge, Düsseldorf 1999
- [60] Tilmanns H., Dietz A., Weber F.: Verdichtung bentonitgebundener Formstoffe durch pneumatische Wirkung, Giesserei 86, 1999, Nr. 6
- [61] Tilmanns H.: GIFA 94: Form- und Kernherstellung mit tongebundenen Formstoffen, Giesserei 81, 1994, Nr. 18
- [62] Volkomič A.A., Maskin A.A., Spickij V.P., Blagonavov B.P., Rozkov A.M.: Impulsnoje uplotnienije formovočnoj smiesi, Lit. Proizv., 1998, nr 2-3

**Załączniki do pracy doktorskiej dostępne są w
Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Wrocławskiej
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
(budynek A1, pokój 307a)**