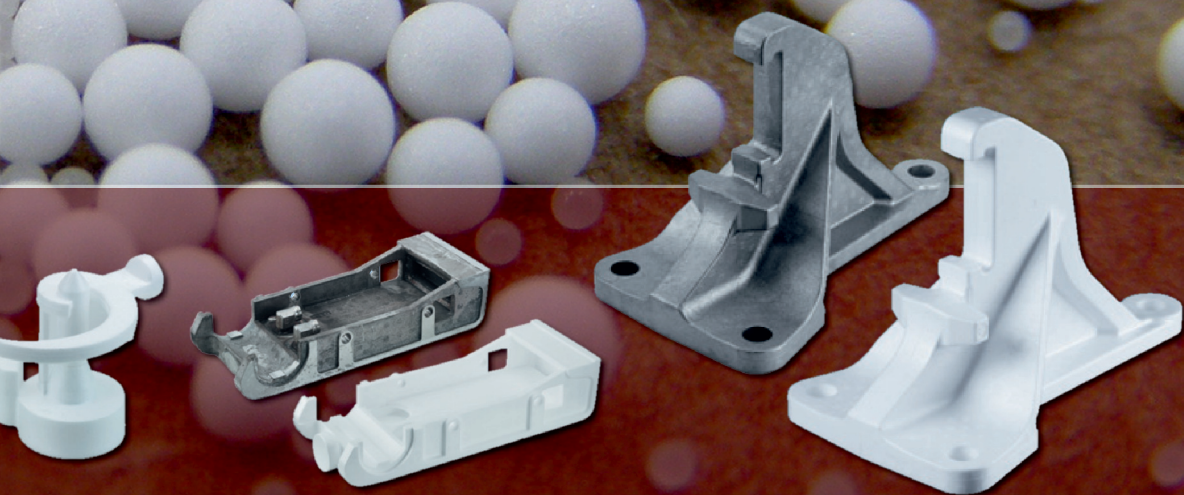


Tadeusz Pacyniak

# **METODA PEŁNEJ FORMY**

## **WYBRANE ASPEKTY**



Monografie Politechniki Łódzkiej

Łódź 2013

**Tadeusz Pacyniak**

**METODA PEŁNEJ FORMY**  
**WYBRANE ASPEKTY**

**Monografie Politechniki Łódzkiej**

**Łódź 2013**

Recenzenci:  
**prof. dr hab. inż. Andrzej Bydalek**  
**prof. dr hab. inż. Zbigniew Gawroński**

**KOMITET REDAKCYJNY**  
**WYDAWNICTWA POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ**

Redaktor Naukowy Wydziału: **prof. dr hab. inż. Tomasz Kapitaniak**

© Copyright by Politechnika Łódzka 2013

**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ**

90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223  
tel./fax 42-684-07-93  
e-mail: [zamowienia@info.p.lodz.pl](mailto:zamowienia@info.p.lodz.pl)  
[www.wydawnictwa.p.lodz.pl](http://www.wydawnictwa.p.lodz.pl)

**ISBN 978-83-7283-555-0**

Nakład 100 egz. Ark druk. 8,0. Papier offset. 80 g 70 x 100  
Druk ukończono w sierpniu 2013 r.  
Wykonano w drukarni „Quick-Druk” s.c. 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11

# SPIS TREŚCI

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. WPROWADZENIE .....</b>                                                         | <b>5</b>  |
| 1.1. RYS HISTORYCZNY .....                                                           | 6         |
| 1.2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROCESU .....                                            | 7         |
| <b>2. KLASYFIKACJA PROCESU ZGAZOWYWANYCH MODELI .....</b>                            | <b>12</b> |
| <b>3. PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU PEŁNEJ FORMY.....</b>                             | <b>15</b> |
| 3.1. MODELE FIZYCZNE .....                                                           | 15        |
| 3.2. MODELE MATEMATYCZNE .....                                                       | 17        |
| 3.3. BADANIA SYMULACYJNE .....                                                       | 18        |
| 3.4. BADANIA DOŚWIADCZALNE PROCESU PEŁNEJ FORMY .....                                | 25        |
| <b>4. PODSTAWY TECHNOLOGICZNE PROCESU PEŁNEJ FORMY .....</b>                         | <b>33</b> |
| 4.1. PROCES WYTWARZANIA MODELI ZE SPIENIONYCH TWORZYW WIELKOCZĄSTECZKOWYCH .....     | 33        |
| 4.1.1. Wymagania stawiane modelom ze spienionych polimerów .....                     | 35        |
| 4.1.2. Materiały stosowane na modele.....                                            | 35        |
| 4.1.3. Proces wstępnego spieniania .....                                             | 38        |
| 4.1.3.1. Urządzenia do wstępnego spieniania .....                                    | 39        |
| 4.1.3.2. Czynniki wpływające na proces wstępnego spieniania .....                    | 49        |
| 4.1.3.3. Badania procesu wstępnego spieniania .....                                  | 50        |
| 4.1.4. Sezonowanie .....                                                             | 56        |
| 4.1.5. Proces kształtowania modeli ze spienionych polimerów.....                     | 58        |
| 4.1.5.1. Proces kształtowania modeli dla produkcji seryjnej .....                    | 58        |
| 4.1.5.1.1. Urządzenia do kształtowania modeli poprzez spiekanie .....                | 62        |
| 4.1.5.1.2. Czynniki wpływające na proces spiekania modeli .....                      | 64        |
| 4.1.5.1.3. Badania procesu spiekania modeli w autoklawie .....                       | 66        |
| 4.1.5.2. Proces kształtowania modeli dla produkcji jednostkowej i małoseryjnej ..... | 70        |
| 4.1.5.2.1. Wykonywanie modeli na ploterach termicznych .....                         | 71        |
| 4.1.5.2.2. Wykonywanie modeli na obrabiarkach CNC.....                               | 73        |
| 4.1.5.2.3. Wykonywanie modeli łączonych z wielu części .....                         | 76        |
| 4.2. PRZYGOTOWANIE ZESTAWÓW MODELOWYCH.....                                          | 78        |
| 4.3. NANOSZENIE POKRYCIA OGNIOTRWAŁEGO NA ZESTAWY MODELOWE.....                      | 79        |
| 4.3.1. Rodzaje i własności pokryć ogniotrwałych .....                                | 80        |
| 4.3.2. Metody nanoszenia pokryć ogniotrwałych.....                                   | 82        |
| 4.4. FORMOWANIE ZESPOŁÓW MODELOWYCH W MASACH BEZ LEPISZCZA .....                     | 83        |
| 4.4.1. Zasypywanie zespołów modelowych.....                                          | 84        |

|                                                                   |            |
|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.1.1. Piaski formierskie .....                                 | 87         |
| 4.4.2. Zagęszczanie piasków formierskich.....                     | 88         |
| 4.5. FORMOWANIE W MASACH CHEMOUTWARDZALNYCH .....                 | 92         |
| <b>5. FORMY DO WYTWARZANIA MODELI DLA PROCESU LOST FOAM .....</b> | <b>96</b>  |
| 5.1. FORMY DO KSZTAŁTOWANIA MODELI NA AUTOMATACH.....             | 96         |
| 5.2. ELEMENTY STANDARDOWE .....                                   | 102        |
| 5.2.1. Pistolety napełniające .....                               | 102        |
| 5.2.2. Wypychacze.....                                            | 105        |
| 5.2.3. Dysze parowe .....                                         | 107        |
| 5.3. FORMY DO KSZTAŁTOWANIA MODELI W AUTOKŁAWACH .....            | 109        |
| <b>LITERATURA.....</b>                                            | <b>112</b> |

# 1. WPROWADZENIE

Metoda pełnej formy, w której wykorzystywane są modele ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych, budzi coraz większe zainteresowanie w procesie wytwarzania odlewów. Technologia tą można wykonywać odlewy o skomplikowanych kształtach, o wymiarach od kilkunastu milimetrów do kilku metrów i o masie od kilkudziesięciu gramów do kilkunastu Mg. Duże zainteresowanie tą technologią wytwarzania odlewów jest spowodowane znacznie niższymi kosztami produkcji i inwestycji w porównaniu z technologią tradycyjną [1]. Metoda ta w stosunku do tradycyjnego odlewania w masach formierskich klasycznych posiada szereg zalet m.in.

- możliwość otrzymywania wewnętrznych powierzchni odlewu bez stosowania rdzeni,
- znacznie niższe koszty produkcji,
- zastosowanie masy formierskiej bez spoiwa eliminuje kosztowny proces przygotowania mas formierskich,
- zmniejszenie liczby operacji oczyszczania odlewów ze względu na brak rdzeni i powierzchni podziału formy (brak zalewek),
- zmniejszenie ilości urządzeń i oprzyrządowania technologicznego (brak formierek, mieszarek do sporządzania mas itp.),
- zmniejszenie pracochłonności finalnych operacji w następstwie braku zalewek, przypalenia itp.

W niniejszej monografii przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące wykonywania odlewów z wykorzystaniem zgazowywanych modeli. W rozdziale trzecim omówiono wybrane modele fizyczne i matematyczne oraz przedstawiono badania symulacyjne procesu zapelniania wnętrza formy ciekłym stopem dla metody pełnej formy.

W rozdziale czwartym przedstawiono wybrane zagadnienia technologiczne procesu pełnej formy. Omówiono procesy wytwarzania modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych zarówno dla produkcji jednostkowej, jak i produkcji seryjnej i wielkoseryjnej. Dla produkcji jednostkowej przedstawiono procesy wytwarzania modeli z wykorzystaniem obróbki ubytkowej na obrabiarkach CNC oraz z wykorzystaniem ploterów termicznych. W wymienionych metodach wykorzystuje się do obróbki modeli bloki styropianowe. Dla produkcji seryjnej przedstawiono dwa procesy wytwarzania modeli styropianowych w matrycach metalowych. Pierwszy,

polegający na napełnieniu matrycy metalowej wstępie spienionymi granulkami styropianu i ich spiekaniu przy użyciu pary wodnej w autoklawie. Drugi, polegający na napełnianiu matrycy i spiekaniu przy użyciu pary wodnej na automatach. Zarówno dla pierwszego procesu, jak i dla drugiego stosowany jest wstępnie spieniony polistyren. W czwartym rozdziale monografii szczegółowo omówiono proces wstępnego spieniania polistyrenu i urządzenia do tego procesu stosowane. W rozdziale tym przedstawiono również badania procesu wstępnego spieniania oraz badania kształtowania modelu poprzez spiekanie w autoklawie, które przeprowadzono w Katedrze Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej. Przedstawiono również technologię wytwarzania zestawów modelowych, rodzaje pokryć ogniotrwałych i metody ich nanoszenia. Omówiono sposoby formowania zestawów modelowych w suchych piaskach formierskich bez lepiszcza oraz przedstawiono formowanie w masach chemoutwardzalnych wraz z przykładowymi odlewami dużych korpusów żeliwnych.

W rozdziale piątym podjęto próbę omówienia oprzyrządowania do wytwarzania modeli styropianowych dla procesu lost foam. Przedstawiono zasady i sposoby konstrukcji form zarówno do procesu kształtowania modeli w autoklawach, jak i konstrukcję form do wytwarzania modeli na automatach.

Mam nadzieję, że zagadnienia przedstawione w niniejszej monografii będą dla czytelników źródłem wiedzy z zakresu technologii wytwarzania odlewów metodą pełnej formy zarówno ze stopów żelaza, jak i stopów nieżelaznych. Treści przedstawione w monografii mogą stanowić literaturę uzupełniającą dla studentów kierunków odlewnictwa, inżynierii produkcji, inżynierii materiałowej, jak również dla pracowników przemysłu odlewniczego i styropianowni.

## **1.1. Rys historyczny**

Proces produkcji odlewów z wykorzystaniem modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych jest znany na świecie od 1958 roku, to jest od ogłoszenia przez Shroyer'a patentu [2], w którym zastosował model styropianowy odwzorowujący kształty odlewu. Początkowo proces wykorzystujący styropianowe modele, które podczas zalewania ulegają zgazowywaniu, był stosowany w produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Modele były składane i klejone z fragmentów wycinanych z płyt styropianowych i formowane w klasycznych

masach formierskich. Tak wytwarzane modele styropianowe nie spełniały warunków dotyczących dokładności wymiarowo-kształtowej, jak i chropowatości powierzchni odlewów. Powtórne zainteresowanie procesem wytwarzania odlewów metodą wykorzystującą zgazowywane modele odlewnicze (Evaporative Pattern Casting – EPC) nastąpiło pod koniec lat osiemdziesiątych XX stulecia, gdy wygasły patenty Shroyer’a i Smith’a [2, 3], a rozwój technologii umożliwił zastosowanie procesu do masowej produkcji odlewów o dużej dokładności i powtarzalności wymiarowej, zarówno ze stopów żelaza, jak i stopów nieżelaznych. Jednakże dopiero od 1987 r. wytwarza się odlewy w USA, Włoszech, Francji, Anglii i Niemczech z wykorzystaniem tego procesu [4]. Należy zaznaczyć, iż w zależności od firmy oferującej technologię pełnej formy FM nazwa handlowa procesu przybiera różne postacie. Na początku powstały dwie propozycje opracowanych odmian o nazwach simplicast FM i replicast FM [5]. W późniejszym okresie powstały też odmiany, takie jak polycast, ventless oraz castyral [6]. W USA dla procesu pełnej formy przyjęto nazwę Lost Foam Casting czy Lost Foam (w skrócie – LFC lub LF). Rozumiano pod nim ogólną cechę modeli traconych: spalanych lub zgazowywanych w czasie zalewania formy ciekłym stopem [7]. Kolejna odmiana procesu FM, polegająca na wykonywaniu ceramicznych form skorupowych z zastosowaniem modeli styropianowych, to proces replicast CS (ceramic shell – ceramiczna forma skorupowa). W tym procesie model polistyrenowy usuwa się poprzez wypalenie form ceramicznych przed ich zalaniem ciekłym stopem.

## 1.2. Ogólna charakterystyka procesu

Proces pełnej formy otrzymywania odlewów rozpoczyna się od wykonania jednorazowego modelu ze spienionego polimeru, np. ze spienionego polistyrenu. Model ze spienionego polimeru jest pokrywany ogniotrwałym pokryciem ceramicznym, które stanowi roboczą powierzchnię formy odlewniczej, a następnie zaformowany jest w piasku bez lepiszcza. W celu uzyskania odpowiedniego zagęszczenia piasku formierskiego formę poddaje się wibracji, a następnie zalewa ciekłym stopem. W trakcie wypełniania wnęki formy model polimerowy ulega cieplnej degradacji i stopniowo jego objętość jest zastępowana przez ciekły stop, by po zakrzepnięciu stanowić odlew o kształcie modelu. Termiczna degradacja modelu polimerowego na froncie ciekłego metalu ma znaczący wpływ na jakość odlewu. Endotermiczny rozkład modelu polimerowego istotnie oddziałuje na proces wypełniania wnęki formy. Zagadnienia związane z procesem wypełniania wnęki

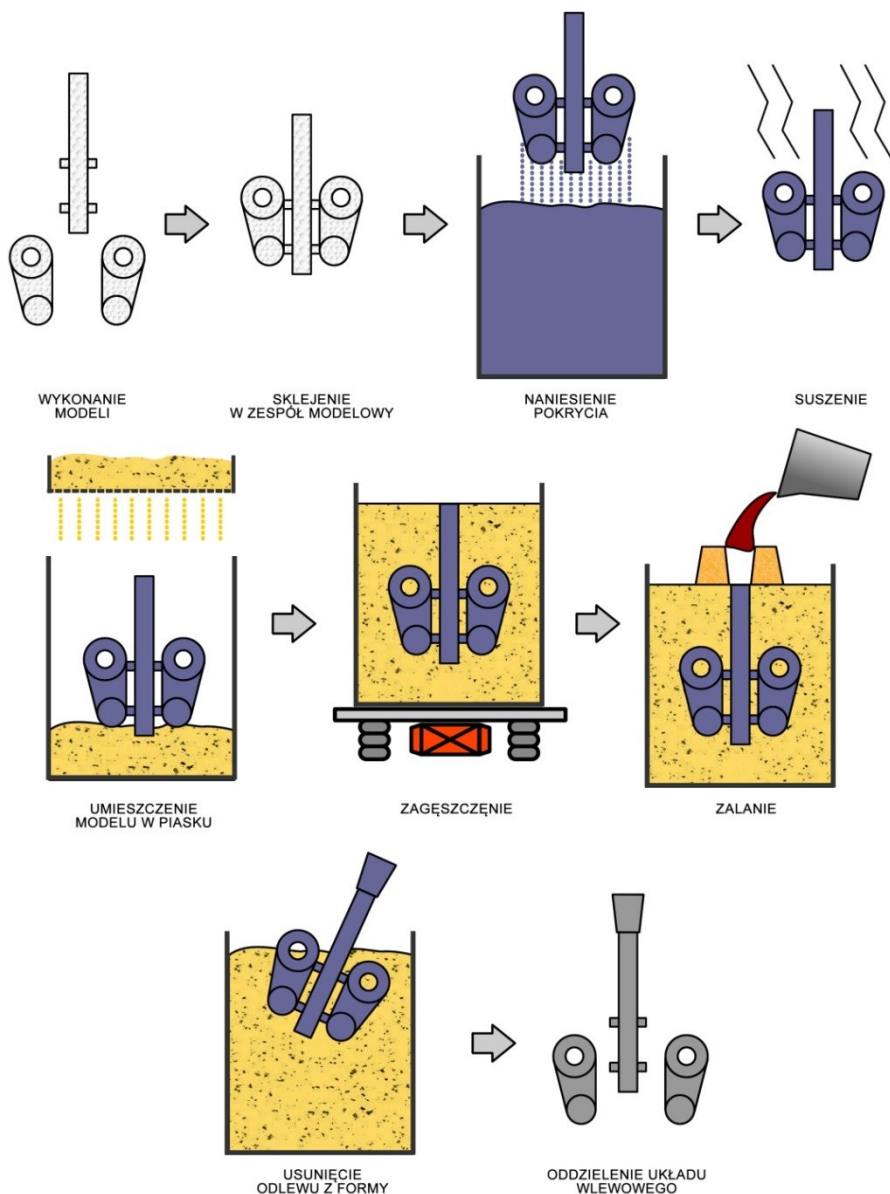
formy, degradacji i zgazowywania modelu polimerowego są skomplikowane i decydują o jakości otrzymanego odlewu.

Analizując proces wytwarzania odlewów metodą pełnej formy, można wyróżnić następujące etapy:

- wykonanie zespołu modelowego,
- naniesienie pokrycia ogniotrwałego na powierzchnię zespołu modelowego i jego suszenie,
- umieszczenie zespołu modelowego w skrzynce formierskiej i zasypanie suchym piaskiem,
- zagęszczenie osnowy piaskowej w skrzynce formierskiej i ewentualne wakuowanie formy,
- zalanie formy ciekłym stopem odlewniczym,
- krzepnięcie, chłodzenie i wyjęcie odlewu ze skrzynki formierskiej.

Poszczególne etapy wykonywania odlewów w procesie pełnej formy przedstawiono na rysunku 1.1.

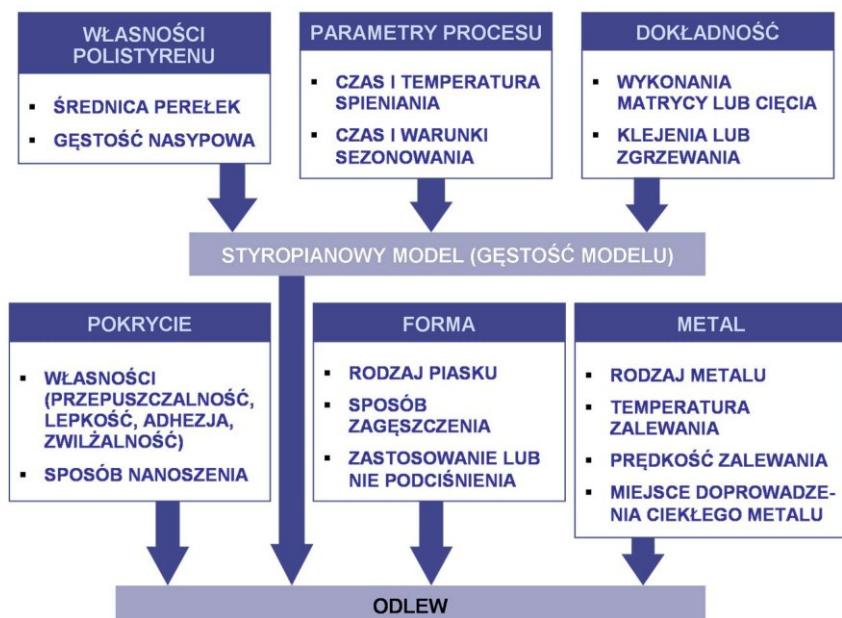
Technologia pełnej formy ma szczególnie szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. Stanowi ona alternatywną technologię dla technologii odlewania ciśnieniowego i kokilowego. Charakteryzuje się niskimi kosztami inwestycyjnymi i wytwarzania w porównaniu z technologią tradycyjną [8]. Nie wymaga stosowania rdzeni, powierzchni podziału formy, pochyleń odlewniczych, a zatem w sposób naturalny uzyskuje się większą dokładność wymiarową odlewu. Stosowanie suchego piasku bez lepiszcza eliminuje wpływ wilgoci na wady odlewów, a ponadto tańsza jest jego regeneracja. Technologię tę można stosować do małych serii, gdyż modele styropianowe wytwarzać można na obrabiarkach sterowanych numerycznie bądź ploterach termicznych.



*Rys. 1.1. Przebieg wykonywania odlewów w metodzie pełnej formy.*

Jednakże w procesie pełnej formy istnieje wiele czynników niewystępujących w klasycznych technologiach odlewniczych mających zasadniczy wpływ na ostateczny jej wynik. Schematycznie przedstawiono je na rysunku 1.2. Od jakości modelu, tj. stanu powierzchni, wytrzymałości, stabilizacji wymiarowej,

gęstości modelu, średnicy perełek styropianu, a nawet ich stopnia połączenia, zależy jakość odlewu.



*Rys. 1.2. Niektóre czynniki wpływające na jakość odlewu.*

Do najistotniejszych czynników mających wpływ na proces pełnej formy należy zaliczyć: gęstość modelu, przepuszczalność i grubość pokrycia ogniotrwałego, ciśnienie w formie, rodzaj stopu oraz temperatura zalewania.

W technologii pełnej formy szczególnie ważną rolę odgrywa gęstość modelu styropianowego [9, 10]. Podczas zalewania kontakt ciekłego metalu z modelem powoduje powstanie dużej ilości gazów, tym większej im większa gęstość modelu i temperatura metalu. W przypadku stopów żelaza i związaną z tym wysoką temperaturą zalewania, objętość wytworzonych gazów jest ponad trzykrotnie większa niż dla stopów aluminium. W wyniku tego w szczelinie gazowej, która tworzy się między frontem zgazowywanego modelu a lustrem metalu, panuje dość znaczne ciśnienie, które hamuje ruch metalu i może doprowadzić do jego zatrzymania.

Bardzo duży wpływ na proces wytwarzania odlewów metodą pełnej formy ma pokrycie ogniotrwałe nanoszone na model ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych. Stanowi ono powierzchnię roboczą formy i zapobiega

penetracji metalu w głąb piasku stanowiącego masę formierską. Powinno mieć bardzo dobrą przepuszczalność, która umożliwi filtrację gazowym i ciekłym produktom rozkładu polistyrenu i swobodne opuszczenie wnętrza formy. To głównie od pokrycia zależy stan powierzchni odlewu. Zbyt mała przepuszczalność powoduje wzrost ciśnienia gazów we wnętrzu, co z kolei może doprowadzić do zagazowania odlewu [11], pęknięcia pokrycia i wypłynięcia metalu. W tym przypadku na odlewie pojawią wady w postaci tzw. „żyłek”. Nadmierne ciśnienie uniemożliwia dokładne odwzorowanie kształtu, wskutek czego pojawią się niedolewy. Zbyt duża przepuszczalność pokrycia jest przyczyną powstania wad w postaci nasiąków i nadmiernej chropowatości odlewu.

Należy podkreślić bardzo duży wpływ na proces pełnej formy grubości pokrycia ogniotrwałego, która to powinna być jak najmniejsza i nie powinna być większa niż około 0,5 mm. Wraz ze wzrostem grubości pokrycia ogniotrwałego filtracja gazów ze szczeliny gazowej jest utrudniona, co spowalnia proces wypełnienia wnętrza formy przez ciekły metal.

Jednym z istotnych parametrów procesu pełnej formy jest ciśnienie (podciśnienie) w formie. Badania autora wykazały, że wpływ ciśnienia w formie na proces zapełnienia wnętrza formy ciekłym stopem jest najefektywniejszy przy ciśnieniu w granicach 90÷95 kPa. Taka wartość ciśnienia w formie gwarantuje odpowiednio dużą prędkość zalewania, zapewniającą prawidłowe wypełnienie wnętrza formy i dobre odwzorowanie nawet bardzo skomplikowanych kształtów odlewów.

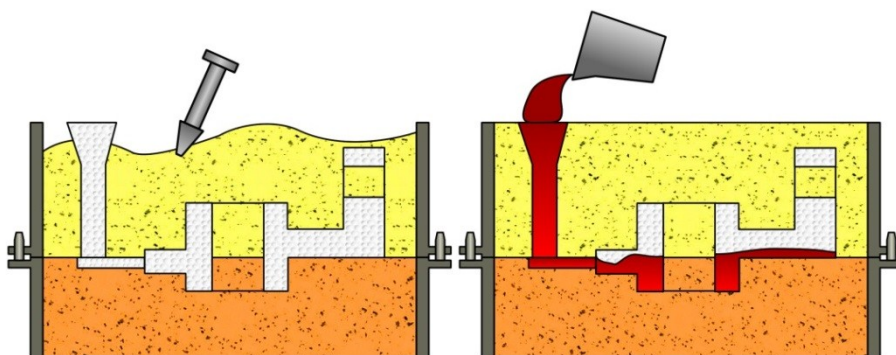
Temperatura zalewania formy jest jednym z parametrów, do którego chętnie sięgają technolodzy w sterowaniu procesem odlewania. Wpływ temperatury zalewania na wypełnienie formy w procesie pełnej formy jest taki, że wraz ze wzrostem temperatury zalewania rośnie prędkość zalewania formy, a maleje ciśnienie w szczelinie gazowej. Wyższa temperatura zalewania, zwiększa temperaturę gazów w szczelinie, a więc i zmniejsza ich lepkość, co ułatwia filtrację gazów przez pokrycie ochronne i złożę piasku w formie. Należy stosować ogólną zasadę, że dla bardziej skomplikowanych i cienkościennych odlewów należy stosować wyższe temperatury zalewania.

## 2. KLASYFIKACJA PROCESU ZGAZOWYWANYCH MODELI

Ścisły podział czy klasyfikacja procesu wytwarzania odlewów metodą wykorzystującą zgazowywane modele odlewnicze (Evaporative Pattern Casting – EPC) jest dzisiaj trudny, ze względu na funkcjonujące w literaturze różne nazwy tych samych lub podobnych procesów. Jednakże poniżej podjęto próbę sklasyfikowania poszczególnych metod, przyjmując za podstawę sposób wykonania formy odlewniczej i modelu. Zaproponowano następującą klasyfikację procesów wytwarzania odlewów wykorzystujących zgazowywane modele odlewnicze:

- proces pełnej formy (replicast FM),
- proces Lost Foam,
- proces replicast CS (ceramic shell).

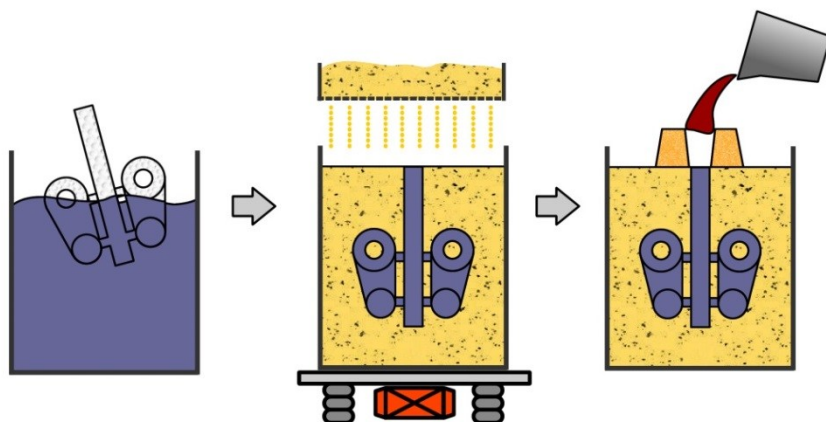
**Proces pełnej formy** (replicast FM) to proces, w którym wykorzystywane są modele ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych, na ogół o dużych gabarytach, które po naniesieniu pokrycia ogniotrwałego formowane są w klasycznych masach kwarcowo-iłowych bądź w masach chemoutwardzalnych. Częściej w tym procesie wykorzystywane są masy chemoutwardzalne. Proces ten zostanie dokładniej przedstawiony w rozdziale 4.4.3. Schematycznie istotę procesu pełnej formy przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Schemat procesu pełnej formy (replicast FM).

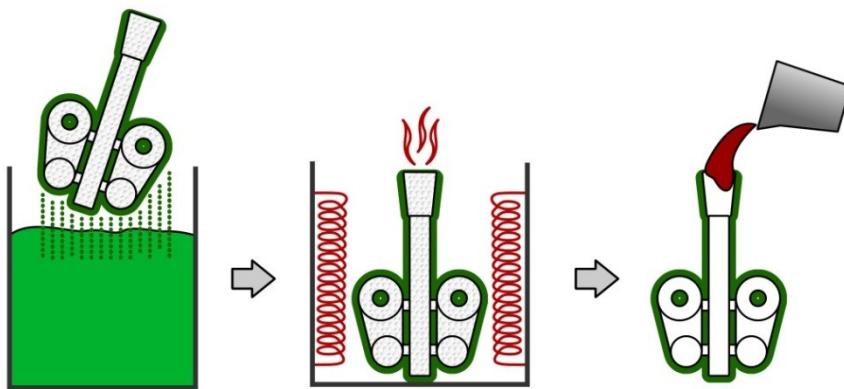
**Proces Lost Foam** to proces, w którym wykorzystywane są modele ze spienionych polimerów, o dużej dokładności wymiarowo-kształtowej, wykonywane w specjalnych formach metalowych (przeważnie aluminiowych),

które po naniesieniu pokrycia ogniotrwałego zasypuje się w suchym piaskiem bez lepiszcza, a następnie zagęszcza poprzez wibracje. Procesowi temu poświęcono w niniejszej monografii najwięcej uwagi. Schemat procesu lost foam przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Schemat procesu lost foam.

**Proces replicast CS** (ceramic shell), to proces w którym modele ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych, o dużej dokładności wymiarowo-kształtowej, wykonywane w formach metalowych, montuje się często w zestawy, na które nanosi się warstwy, zanurzając je w ciekłych mieszankach ceramicznych. Po każdym zanurzeniu naniesioną powłokę poddaje się procesowi dehydratyzacji-suszenia. Poprzez trzy lub czterokrotne naniesienie warstw mieszanki ceramicznej otrzymuje się formę ceramiczną. Następnie w temperaturze  $925\div 1000^{\circ}\text{C}$  formy wygrzewa się przez około 5 minut. Podczas prażenia następuje wypalenie modelu styropianowego (EPS) i utwardzenie formy ceramicznej. Schemat procesu replicast CS (ceramic shell) przedstawiono na rysunku 2.3.



*Rys. 2.3. Schemat procesu replicast CS (ceramic shell).*

Metoda replicast CS wzbudza w świecie coraz większe zainteresowanie jako technologia alternatywna do technologii wytapianych modeli, szczególnie dla odlewów o większej masie. Wynika to stąd, że modele ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych są lżejsze niż modele wytapiane, przy porównywalnej dokładności wymiarowo-kształtowej.

### 3. PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU PEŁNEJ FORMY

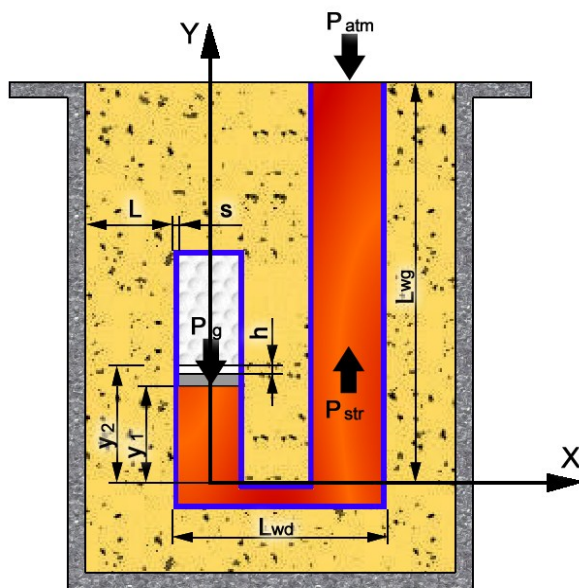
#### 3.1. Modele fizyczne

W większość opisanych literaturze modeli fizycznych to modele, w których ciekły stop wypełnia wnękę formy od dołu. Ze względu na fakt istnienia we wnętrzu formy modelu styropianowego, sposób wypełnienia wnęki formy metalem zależy w głównej mierze od procesu zgazowywania styropianu. Modele zgazowywania styropianu opisane w literaturze światowej można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje: reakcyjno-kinetyczne i fizyczne. Modele reakcyjno-kinetyczne opisują tempo tworzenia się produktów rozkładu polistyrenu w zależności od temperatury i czasu trwania reakcji i nie uwzględniają wpływu wielkości hydrodynamicznych procesu pełnej formy, a tylko właściwości polistyrenu, takie jak gęstość, masa molowa itp.

Modele fizyczne opisują proces degradacji polistyrenu, w wyniku wymiany ciepła między lustrem ciekłego metalu a powierzchnią modelu styropianowego. Wszystkie modele fizyczne zakładają istnienie szczeliny gazowej między metalem a modelem, której grubość ma ogromny wpływ na przebieg wypełnienia wnęki formy. Od wielkości, jak i kształtu szczeliny gazowej zależy bowiem ilość ciepła przetransportowana od ciekłego stopu do modelu, ciśnienie gazów oraz powierzchnia filtracji gazów z wnęki formy.

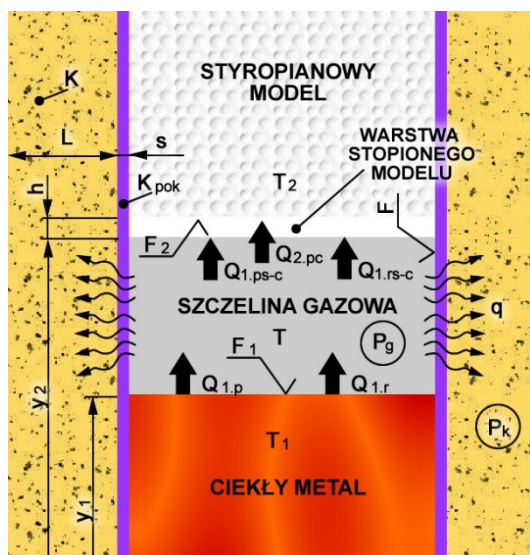
Jednym z pierwszych modeli opisujących proces wypełniania formy przedstawił Stiepanow [12]. Model Stiepanowa przedstawia odlew w kształcie walca wypełniany od dołu ciekłym metalem, który powoduje zgazowywanie modelu spienionego, w wyniku czego powstaje szczelina gazowa, a ciekły stopiony polistyren nim zostanie zgazyfikowany w postaci „plam” pływa po lustrze ciekłego stopu. Doświadczenia w pracach [13, 14, 15, 16, 17] wskazują, że stopiony spieniony model pod wpływem ciepła ciekłego stopu tworzy ciekłą warstwę na powierzchni modelu, a nie metalu. W pracach autora i jego współpracowników [18, 19] przyjęto dwa nieco odmienne modele fizyczne wypełnienia wnęki formy. W pracy [18] przyjęto, że parowanie i gazyfikacja modelu odbywa się wyłącznie z fazy ciekłej, zaś w pracy [19] zgazowywanie modelu styropianowego odbywa się tylko z fazy stałej z pominięciem fazy ciekłej. Na rysunku 3.1 przedstawiono schemat procesu wypełnienia wnęki

formy przy założeniu, że parowanie i gazyfikacja modelu odbywa się z fazy ciekłej i zapelnienie wnęki formy ciekłym stopem jest od dołu.



Rys. 3.1. Schemat procesu wypełnienia wnęki formy.

Schemat modelu fizycznego szczeliny gazowej przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Schemat modelu fizycznego dla szczeliny gazowej.

Dla przedstawionego na rysunku 3.1 i 3.2 modelu fizycznego wypełnienia wnęki formy ciekłym stopem opracowano model matematyczny i algorytm obliczeń umożliwiające badania symulacyjne procesu.

### 3.2. Modele matematyczne

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę wybranych modeli matematycznych w dostępnej autorowi literaturze. Y. Liu, S.I. Bakhtiyarov i R.A. Overflet [20] opracowali jednowymiarowy numeryczny model wypełnienia formy i ciśnienia wydzielanego gazu, w którym wykorzystali do określenia wielkości strumienia ciekłego metalu – równanie Bernoulli’ego, do określenia ciśnienia gazu w szczelinie gazowej – równanie stanu gazu doskonałego, do obliczenia strumienia cieplnego – równanie Fouriera, do obliczenia szkodliwości usuwania gazów z formy – prawo filtracji Darcy’go. Te częściowe równania różniczkowe zostały obliczone metodą różnic skończonych i porównane z wynikami doświadczalnymi. Przedstawiony przez nich charakter zmian prędkości zalewania jest zbliżony do wyników badań prowadzonych przez autora i współpracowników z Katedry Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji. W znacznie szerszym zakresie rozpatrują proces wypełnienia wnęki formy R. Barone i A. Caulk [21]. W ich modelu matematycznym przyjmują kształt szczeliny, która zwiększa swoją wysokość przy pokryciu ogniotrwałym i definiują ją bezwymiarowym współczynnikiem, od którego uzależniają cały model matematyczny. Dodatkowo w obliczeniach przyjmują za masę molową gazów masę monomeru styrenu, który wg danych literaturowych powyżej temperatury 500°C ulega rozkładowi na lżejsze węglowodory. Symulacje dotyczą stopów aluminium dla temperatur zalewania w zakresie 600÷800°C. Formułują błędne wnioski, stwierdzając, że prędkość zalewania nieznacznie maleje wraz ze wzrostem temperatury zalewania. Mirbagheri i inni [22] zajmują się wyłącznie procesem zgazowywania modelu i jego wpływem na ciśnienie w szczelinie gazowej. W modelu wykorzystują równanie stanu gazu i przyjmują jednakową grubość szczeliny gazowej na całej powierzchni, jednakże kształt szczeliny odpowiada kształtowi frontu metalu. Badania prowadzą dla żeliwa. Stwierdzają, że ciśnienie w szczelinie gazowej dla gęstości modelu styropianowego 20 kg/m<sup>3</sup> wynosi około 114 kPa i jest mniejsze niż w pracy [23] o 4 kPa i o 6 kPa w porównaniu z wynikami autora i współpracowników. Hopf, Bast i inni w serii artykułów pod wspólnym tytułem „Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen” [24÷28] przedstawiają opis matematyczny

wypełnienia formy w procesie lost foam, wykorzystując równania bilansu cieplnego, masy i bilansu impaktowego, wyprowadzając jednowymiarowy model stacjonarny wypełnienia formy dla modelu grawitacyjnego odlewania metodą pełnej formy. Jako model przyjęto oscylacje słupa cieczy w U-rurze. Bardzo interesujące badania eksperymentalne prowadzi Shivkumar ze współpracownikami [29÷34], jednak nie podejmuje próby opisu modelu matematycznego. W swoich badaniach wskazuje na bardzo duże znaczenie właściwości pokryć ogniotrwałych oraz modelu styropianowego na proces pełnej formy. Wg jego wyników na proces ma wpływ nie tylko gęstość modelu, ale także wielkość granulek styropianu, sposób ich połączenia [35] i masa molowa samego polistyrenu [31]. W pracy [18] autor niniejszej monografii opracował model fizyczny i matematyczny procesu pełnej formy, w którym jednym z parametrów była średnica granulek styropianu. W pracy stwierdzono, że wraz ze wzrostem średnicy perełek styropianu, dla tej samej gęstości modelu zwiększa się prędkość zalewania. Reasumując przedstawione powyżej modele matematyczne i fizyczne opisujące wypełnienie wnęki formy w metodzie lost foam, należy zauważyć, że większość z nich do opisu matematycznego wykorzystuje równania Bernoullie’go, Darcy’ego, Fourier’a, stanu gazu oraz dynamiczne równanie ruchu.

### **3.3. Badania symulacyjne**

W Katedrze Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji Politechniki Łódzkiej od wielu lat prowadzone są badania procesu pełnej formy zarówno empiryczne, jak i symulacyjne. Badania symulacyjne są prowadzone w oparciu o autorskie modele fizyczne, jak i matematyczne. W wyniku prowadzonych badań naukowych nad procesem lost foam dotychczas zostały wykonane dwie prace kwalifikacyjne. Autor niniejszej książki wykonał monografię stanowiącą pracę habilitacyjną [18] pt: „Teoretyczne i technologiczne podstawy procesu wytwarzania odlewów metodą pełnej formy”. Zagadnienia związane z problematyką pełnej formy były tematem rozprawy doktorskiej dr. inż. Rafała Kaczorowskiego [19] pt: „Wpływ wybranych czynników technologicznych na proces wytwarzania odlewów żeliwnych metodą pełnej formy”, której autor był promotorem. Poniżej zostaną zaprezentowane niektóre wyniki badań symulacyjnych zarówno dla stopów aluminium, jak i dla żeliwa.

Do badań symulacyjnych procesu pełnej formy, a w szczególności zjawisk związanych ze zgazowywaniem modelu i wypełnianiem formy

przez ciekły stop odlewniczy, wykorzystano opracowany przez autora i współpracowników model matematyczny procesu oraz autorski algorytm obliczeń umożliwiające badanie wpływu podstawowych parametrów procesu, takich jak gęstość modelu, przepuszczalność i grubość pokrycia, ciśnienie w formie (podciśnienie), rodzaj stopu odlewniczego, temperatura zalewania, budowa i wielkość układu wlewowego, rodzaj stopu odlewniczego i innych, na m.in. prędkość podnoszenia się lustra metalu w formie, prędkość zgazowywania modelu, ciśnienie gazów w szczelinie gazowej, wielkość szczeliny gazowej.

Do opisu matematycznego wykorzystano równania bilansu cieplnego, dynamiczne równanie ruchu, równanie stanu gazu i równania filtracji Darcy'go. Równanie bilansu cieplnego posłużyło do wyznaczenia prędkości zgazowywania modelu styropianowego, dynamiczne równanie ruchu pozwoliło na wyznaczenie prędkości podnoszenia się lustra metalu, zaś równanie stanu gazu i prawo filtracji Darcy'go, do określenia zmian ciśnienia gazów w szczelinie gazowej.

W niniejszej pracy przedstawiono opis modelu matematycznego procesu zgazowywania modelu styropianowego i wypełnienia wnęki formy, którego model fizyczny przedstawiono rysunkach 3.1. i 3.2. Układ równań różniczkowych pierwszego rzędu opisujący wypełnienie wnęki formy w metodzie pełnej formy i pozwalający oszacować wpływ podstawowych parametrów technologicznych procesu na zmianę położenia frontu zgazowywanego modelu, położenia i prędkości lustra ciekłego stopu oraz ciśnienia gazów w szczelinie gazowej. Układ tych równań, będący modelem matematycznym procesu pełnej formy, przedstawiono poniżej.

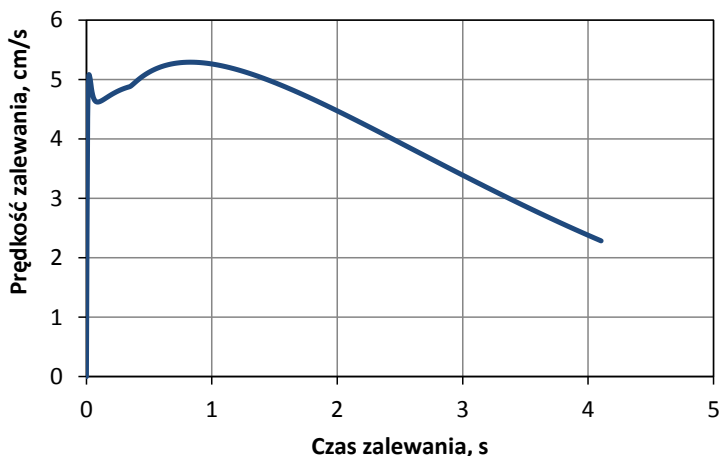
$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dy_2}{d\tau} &= \frac{\left\{ \left( \alpha_c + \frac{\lambda_g}{(y_2 - y_1) - h} \right) \cdot (T_1 - T_{2.par}) - c \cdot [r_p + c_{2.c} \cdot (T_{2.par} - T_{2.top})] \right\} \cdot F_{par}}{[r_t + c_{2.m} \cdot (T_{2.top} - T_{2.0})] \cdot F_2 \cdot \rho_2} \\ \frac{dv_1}{d\tau} &= \frac{P_{atm} - \frac{1}{2} \cdot \lambda_H \cdot F_1^2 \cdot \rho_1 \cdot v_1^2 \left( \frac{L_{wg}}{d_{stw_g} \cdot F_{wg}^2} + \frac{L_{wd}}{d_{stw_d} \cdot F_{wd}^2} \right) + \rho_1 \cdot g \cdot (L_{wg} - y_1) - P_g}{F_1 \cdot \rho_1 \cdot \left( \frac{L_{wg}}{F_{wg}} + \frac{L_{wd}}{F_{wd}} + \frac{y_1}{F_1} \right)} \\ \frac{dy_1}{d\tau} &= v_1 \\ \frac{dP_g}{d\tau} &= \frac{c \cdot F_{par} \cdot R \cdot T}{(y_2 - y_1) \cdot F_1} - \frac{1,57 \cdot (P_p^2 - P_k^2) \cdot K \cdot \rho_3 \cdot (d_2 + s) \cdot R \cdot T}{F_1 \cdot l \cdot P_{atm}} + \\ &\quad - \frac{P_g}{(y_2 - y_1)} \cdot \frac{d(y_2 - y_1)}{d\tau} \end{aligned} \right.$$

Badania symulacyjne prowadzono z wykorzystaniem autorskiego algorytmu obliczeń, w którym wykorzystano funkcję pozwalającą rozwiązywać równania różniczkowe metodą Runge-Kutta'y czwartego rzędu. Wyniki symulacji otrzymano w postaci macierzy, której poszczególne kolumny stanowiły kolejno:

- czas  $\tau$ ,
- położenie lustra metalu  $y_1$ ,
- prędkość lustra metalu  $v_1$ ,
- położenie frontu zgazowywanego modelu  $y_2$ ,
- ciśnienie gazów w szczelinie gazowej  $P_g$ ,
- prędkość topienia i zgazowywania modelu  $v_2$ .

Badania symulacyjne przeprowadzono dla modelowej formy, której schemat przedstawiono na rysunku 3.1 i 3.2. Doświadczalny odlew o średnicy  $\phi 30$  mm i wysokości 170 mm był zasilany wlewem głównym o średnicy  $\phi 30$  mm i wysokości 300 mm poprzez wlew doprowadzający o przekroju  $F_{wd} = 0,5 \text{ cm}^2$ . Do obliczeń przyjęto gęstość modelu styropianowego  $\rho_2 = 20 \text{ kg/m}^3$ . Ponadto do badań symulacyjnych przyjęto; przepuszczalność pokrycia ogniotrwałego  $K_p = 7,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ , grubość pokrycia ogniotrwałego  $s = 0,6 \text{ mm}$ , ciśnienie w formie  $P_k = 100 \text{ kPa}$ , temperaturę zalewania ciekłego stopu  $T_l = 998 \text{ K}$ , wielkość granulek styropianu  $d_g = 1 \text{ mm}$ . Badania symulacyjne wpływu poszczególnych wielkości na proces wypełniania wnęki formy prowadzono dla

siluminu AlSi11. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń sporządzono zależności zmian w czasie podstawowych wielkości charakteryzujących proces zapełniania formy ciekłym stopem. Przykładowe zależności przedstawiono poniżej. Przebieg zmiany prędkości zalewania  $v_l=f(\tau)$  przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Zmiana prędkości zalewania dla siluminu  $v_l=f(\tau)$ .

Widoczny na początku wzrost prędkości zalewania jest spowodowany dużym ciśnieniem metalostatycznym ciekłego stopu. Jednocześnie następuje bardzo duży wzrost ciśnienia w szczelinie gazowej (patrz rys. 3.4), przy niewielkiej jej wielkości (patrz rys.3.5), co powoduje zmniejszenie prędkości. Następnie wielkość szczeliny rośnie, wartość ciśnienia w szczelinie gazowej maleje i dlatego prędkość zalewania rośnie, osiągając swoje maksimum. Wraz z upływem czasu wielkość szczeliny gazowej rośnie mniej intensywnie, ciśnienie w szczelinie gazowej maleje, jednak ciągle zmniejszające się ciśnienie metalostatyczne powoduje zmniejszanie prędkości zalewania aż do chwili całkowitego wypełnienia wnętrza formy.

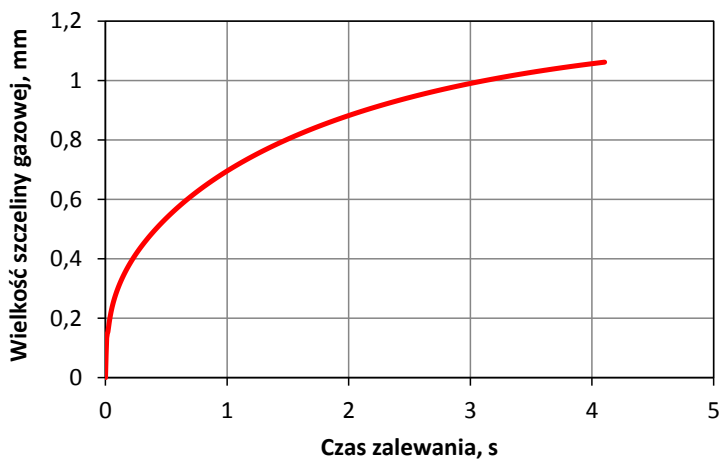
Na rysunku 3.4 przedstawiono zmianę ciśnienia w szczelinie gazowej  $P_g = f(\tau)$ .



Rys. 3.4. Zmiana ciśnienia w szczelinie gazowej  $P_g=f(\tau)$ .

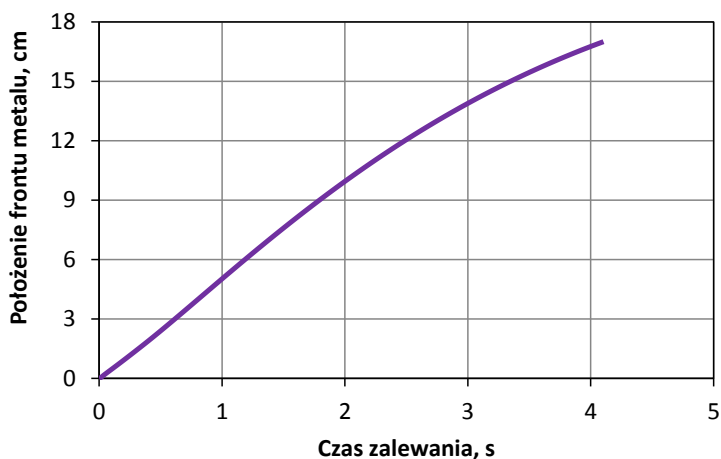
Na początku procesu zalewania ciśnienie w szczelinie gazowej szybko rośnie do wartości maksymalnej, a następnie maleje aż do końca procesu wypełniania wnęki formy. Taki charakter zmian ciśnienia jest związany ze zmianą ciśnienia metalostatycznego, które zmniejsza się wraz z wypełnianiem wnęki formy ciekłym stopem. Ponadto wraz z zapelnianiem wnęki rośnie szczelina gazowa (patrz rys. 3.5), a tym samym powierzchnia filtracji, co również przyczynia się do spadku ciśnienia w szczelinie gazowej.

Przebieg zmiany wielkości szczeliny gazowej  $y_2 - y_1=f(\tau)$  pokazano na rysunku 3.5. W pierwszym okresie zapelniania formy wielkość szczeliny szybko rośnie, a następnie jej wzrost zachodzi znacznie wolniej, osiągając wartość maksymalną w końcu zalewania. Taki charakter zmian wielkości szczeliny gazowej w okresie zalewania należy tłumaczyć tym, że aby odprowadzić gazy (powstałe ze zgazowywania modelu) ze szczeliny, w której panuje coraz mniejsze ciśnienie, powierzchnia filtracji powinna rosnąć, co oznacza wzrost wysokości szczeliny gazowej. Wraz z zapelnianiem ciekłym stopem wnęki formy zmniejszająca się prędkość zalewania sprzyja zwiększaniu się szczeliny gazowej.



Rys. 3.5. Zmiana wielkości szczeliny gazowej  $y_2 - y_1 = f(\tau)$ .

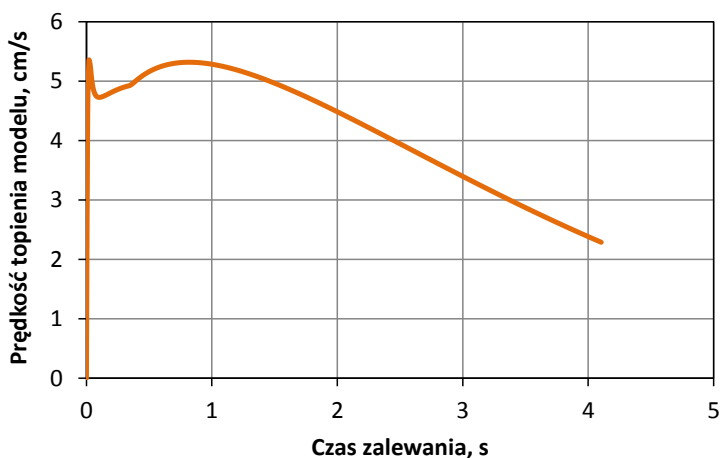
Zmianę położenia czoła metalu w czasie zalewania  $y_1 = f(\tau)$  przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Zmiana położenia frontu metalu w czasie zalewania  $y_1 = f(\tau)$ .

Na początku wypełniania formy przez ciekły metal wysokość metalu we wnętrzu formy zmienia się nieco szybciej, a w końcowej fazie wolniej, co jest zgodne z charakterem zmian prędkości podnoszenia się lustra metalu.

Prędkość topienia się modelu  $v_2=f(\tau)$  podczas zalewania przedstawiono na rysunku 3.7.



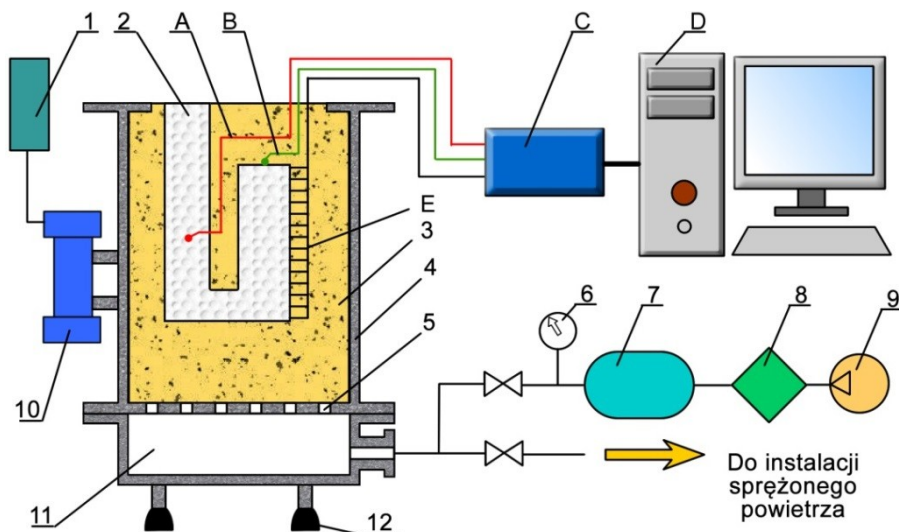
Rys. 3.7. Przebieg prędkości topienia modelu podczas zalewania  $v_2=f(\tau)$ .

Charakter zmiany prędkości topienia modelu podczas zapełniania formy ciekłym stopem jest podobny do zmian prędkości podnoszenia się lustra metalu. Prędkość topienia modelu jest nieznacznie większa od prędkości zalewania. Jest to przypadek, gdy  $v_1 \approx v_2$ , co odpowiada płaskiemu frontowi topienia spienionego modelu [12]. Przypadek ten jest najkorzystniejszy i sprzyja powstawaniu odlewu bez wad odlewniczych, spowodowanych głównie przez okluzję materiału modelu do odlewu.

Niniejszej pracy przedstawione tylko niewielki wycinek badań symulacyjnych prowadzonych przez autora, prezentujący charakter zmian, zdaniem autora, podstawowych wielkości procesu pełnej formy, jakimi są: prędkość zalewania  $v_1$ , prędkość zgazowywania modelu styropianowego  $v_2$ , ciśnienie w szczelinie gazowej  $P_g$ , wielkość szczeliny gazowej. Badanie wpływu gęstości modelu  $\rho_2$ , przepuszczalność  $K_p$  i grubość pokrycia  $s$ , ciśnienie w formie  $P_k$ , wielkości przekroju wlewu doprowadzającego  $F_{wd}$ , temperatura zalewania  $T_l$ , wielkości granulek styropianu  $d_g$ , rodzaju stopu odlewniczego, na podstawowe wielkości procesu pełnej formy obszernie przedstawiono w monografii autora [18].

### 3.4. Badania doświadczalne procesu pełnej formy

Badania doświadczalne procesu pełnej formy prowadzi na świecie bardzo wielu badaczy m.in. Liu [20], Baron [13, 21], Mirbagheri [22], Yang [23], Hopf [24÷28], Shivkumar [29÷35], Caulk [14], Yao [17] i inni. W niniejszej pracy przedstawiono tylko badania doświadczalne prowadzone przez autora i współpracowników z Katedry Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji. Prace eksperymentalne procesu formowania oraz zjawisk zachodzących podczas zapełniania formy prowadzono na zaprojektowanym i wykonanym przez autora doświadczalnym stanowisku formowania zestawów modelowych i zalewania form ciekłym stopem. Schemat doświadczalnego stanowiska formowania i badania zjawisk przy zalewaniu form w procesie pełnej formy przedstawiono na rysunku 3.8.



Rys. 3.8. Schemat doświadczalnego stanowiska do formowania i badania procesu pełnej formy

1 – falownik, 2 – styropianowy model, 3 – piasek kwarcowy bez lepiszcza, 4 – skrzynia formierska, 5 – perforowane dno, 6 – wakuometr, 7 – zbiornik akumulacyjny, 8 – filtr powietrza, 9 – pompa próżniowa, 10 – elektrowibrator, 11 – skrzynia powietrzna, 12 – elementy elastyczne (wibroizolatory), A – termoelement typu S, B – termoelement typu K, C – karta analogowo-cyfrowa, D – komputer klasy PC, E – zestaw 16 elektrod.

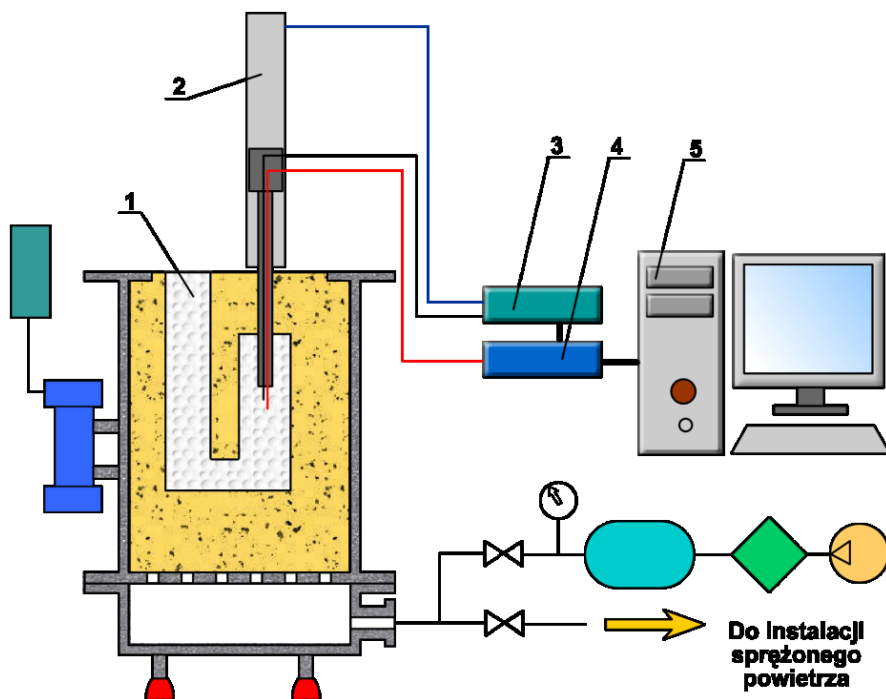
Stanowisko to jest wyposażone w skrzynię formierską (4) o podwójnych ściankach i perforowanym dnie (5), instalację próżniową oraz elektrowibrator silnikowy, służący do zagęszczania masy formierskiej (suchego piasku bez lepiszcza), sterowany za pomocą falownika (1), który umożliwia dobór optymalnej częstotliwości i amplitudy drgań, co pozwala na uzyskanie odpowiedniego zagęszczenia piasku kwarcowego. Konstrukcja skrzyni formierskiej umożliwiała podłączenie instalacji sprężonego powietrza oraz instalacji próżniowej. Instalacja próżniowa składała się z pompy próżniowej (9), filtru powietrza (8) i zbiornika akumulacyjnego (7) oraz wakuometru (6). Odpowiednimi zaworami doprowadzano sprężone powietrze do komory powietrznej (11) pod perforowanym dnem (5) w celu fluidyzowania złoża piasku w skrzyni formierskiej. Stanowisko wyposażono w system pomiarowo-rejestrujący, umożliwiający pomiar prędkości wypełnienia wnęki formy przez ciekły stop, w skład którego wchodziły:

- komputer klasy PC (D),
- karta analogowo-cyfrowa PCI-1710 firmy Advantech (C),
- termoelement typu K (B), termoelement typu S (A),
- zestaw 16 stalowych elektrod (E).

W wyniku zastosowania elektrod rozłożonych w równomiernych odstępach wzdłuż wysokości modelu styropianowego można było rejestrować średnie prędkości zalewania pomiędzy elektrodami. System ten nie pozwalał na rejestrację ciągłą prędkości zalewania.

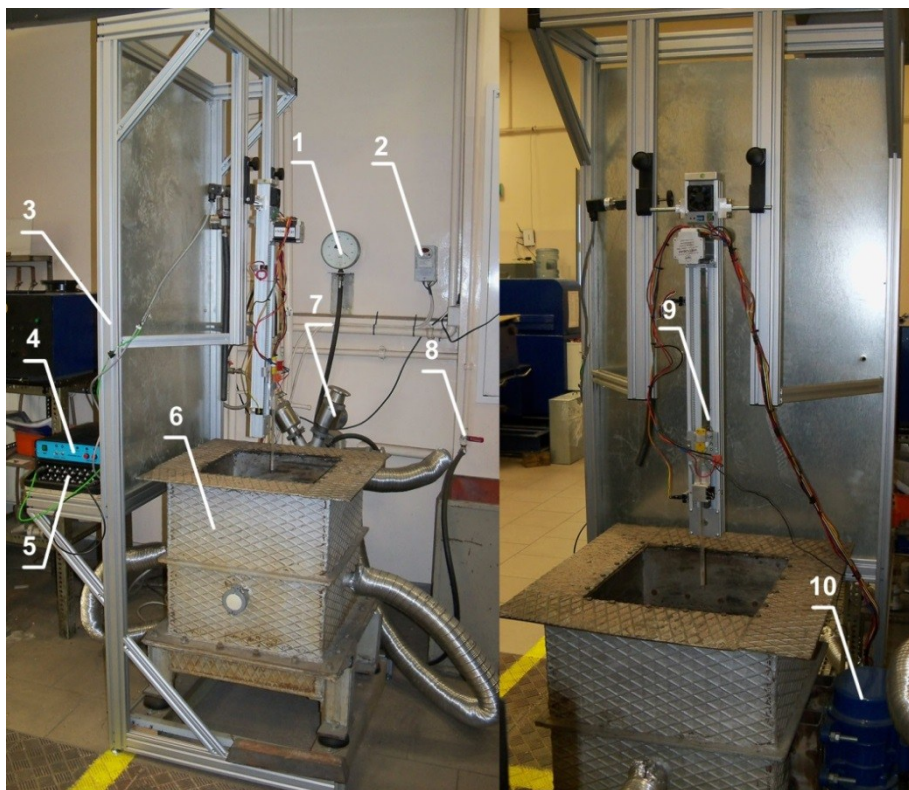
W celu umożliwienia ciągłego pomiaru prędkości zalewania doposażono stanowisko w układ pomiarowy zaprojektowany i wykonany we współpracy z Profesorem Mutwilem z Uniwersytetu Zielonogórskiego. Układ pomiarowy prędkości podnoszenia się lustra metalu we wnęce formy jest wyposażony w moduł liniowy MLA-SK, sterownik SSK-1 i przetwornik pomiarowy MP16B, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.9. Przetwornik pomiarowy typu MP16B jest urządzeniem do pomiarów napięć pochodzących z termoelektrycznych czujników temperatury. Posiada 12 wejść niskonapięciowych przeznaczonych do współpracy z czujnikami termoelektrycznymi, 3 wejścia do pomiarów sygnałów napięciowych standardowych w zakresie napięć od 0 do 5V i 1 wejście przeznaczone do współpracy z czujnikiem termorezystancyjnym PT100. Sterownik SSK-1 jest przeznaczony do współpracy z modułem liniowym MLA-SK. Razem z modułem stanowi on kompletne urządzenie do realizacji pomiarów przemieszczeń i temperatury czoła strugi płynącego metalu. Moduł napędzany jest standardowo

silnikiem krokowym, a ruch obrotowy kół zębatych zamieniany jest na przemieszczenie liniowe sondy pomiarowej za pomocą paska zębatego. Do rejestracji i analizy danych wykorzystywane jest oprogramowanie PDOC – 16USB pozwalające w czasie rzeczywistym na pomiar i prezentację graficzną wyników.



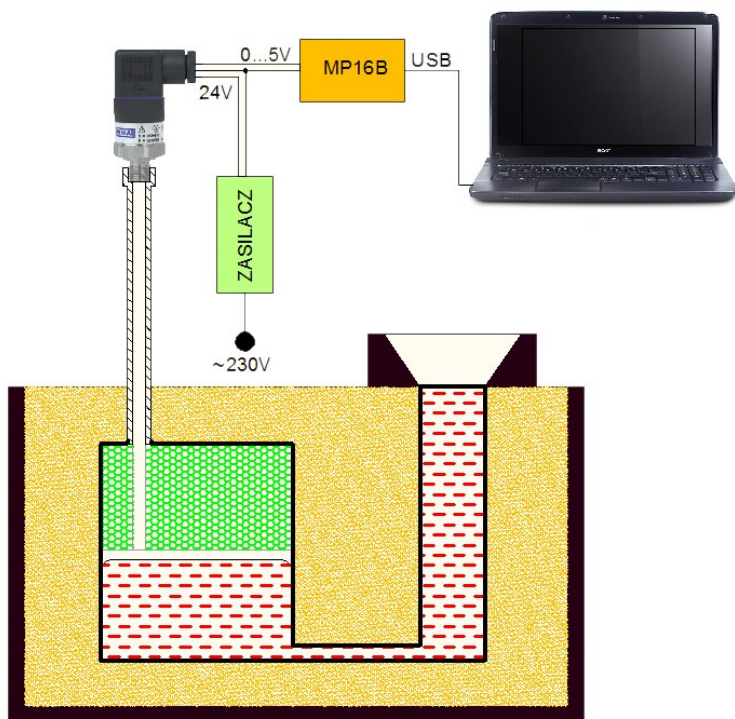
*Rys. 3.9. Schemat stanowiska do ciągłego pomiaru prędkości zalewania  
1 – styropianowy model, 2 – moduł liniowy MLA-SK z termoelementem typu K  
i elektrodą, 3 – sterownik SSK-1, 4 – przetwornik pomiarowy typu MP16B,  
5 – komputer klasy PC.*

Fotografię stanowiska badawczego formowania i zalewania do ciągłego pomiaru i rejestracji położenia i prędkości zalewania, temperatury stopu i ciśnienia w szczelinie gazowej przedstawiono na rysunku 3.10.



*Rys. 3.10. Widok rzeczywisty stanowiska badawczego formowania i zalewania  
 1 – wakuometr, 2 – falownik, 3 – stojan, 4 – sterownik SSK-1, 5 – przetwornik pomiarowy typu MP16B, 6 – skrzynia formierska z perforowanym dnem,  
 7 – zawór instalacji próżniowej, 8 – zawór instalacji sieci sprężonego powietrza,  
 9 – moduł liniowy MLA-SK, 10 – elektrowibrator mechaniczny.*

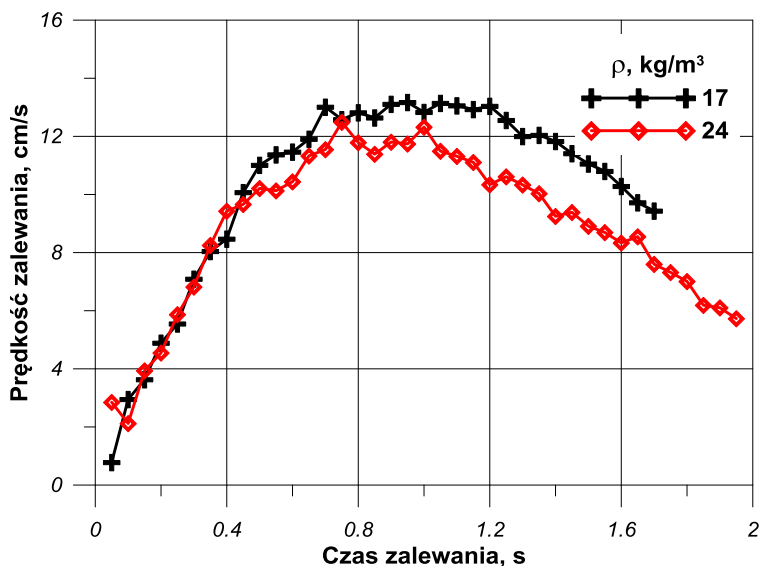
Stanowisko badawcze formowania i zalewania wyposażono również w układ pomiaru ciśnienia w szczelinie gazowej, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.11. Jego zasadniczym elementem jest piezorezystancyjny przetwornik ciśnienia firmy Wika – A-10. Czujnik zamocowany był do stalowej rurki łączącej go z modelem, w którym wykonano otwór pomiarowy. Rejestracja odbywała się przy wykorzystaniu przetwornika MP16B.



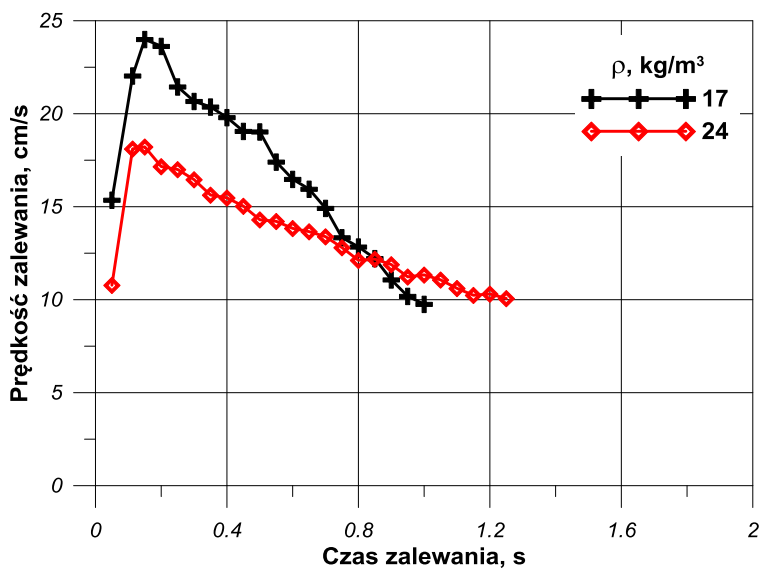
Rys. 3.11. Schemat układu pomiaru ciśnienia w szczelinie gazowej.

Na opisanych powyżej stanowiskach doświadczalnych przeprowadzono badania wpływu gęstości modelu styropianowego, ciśnienia w formie, grubości pokrycia ogniotrwałego oraz temperatury zalewania na prędkość zalewania i ciśnienie gazów w szczelinie gazowej. Poniżej przedstawiono tylko niektóre wyniki badań dla stopu aluminium AlSi11 oraz żeliwa szarego EN-GJL-200. I tak, na rysunku 3.12 przedstawiono wpływ gęstości modelu styropianowego na przebieg zmiany prędkości zalewania dla siluminu AlSi11. Dla gęstości modelu mniejszych  $\rho = 17 \text{ kg/m}^3$  prędkości zgazowywania modelu są większe, a więc i większe prędkości zalewania. W początkowym okresie prędkość zalewania rośnie do wartości maksymalnych, a następnie pod koniec zalewania maleje. Podobny rzeczywisty charakter zmian prędkości zalewania zarejestrowano dla żeliwa szarego EN-GJL-200, który przedstawiono na rysunku 3.13.

Z rysunków wynika, że zarówno dla siluminu, jak i żeliwa prędkości zalewania są większe, im mniejsza jest gęstość modelu. Jednakże jest nieco inny charakter zmian prędkości zalewania.



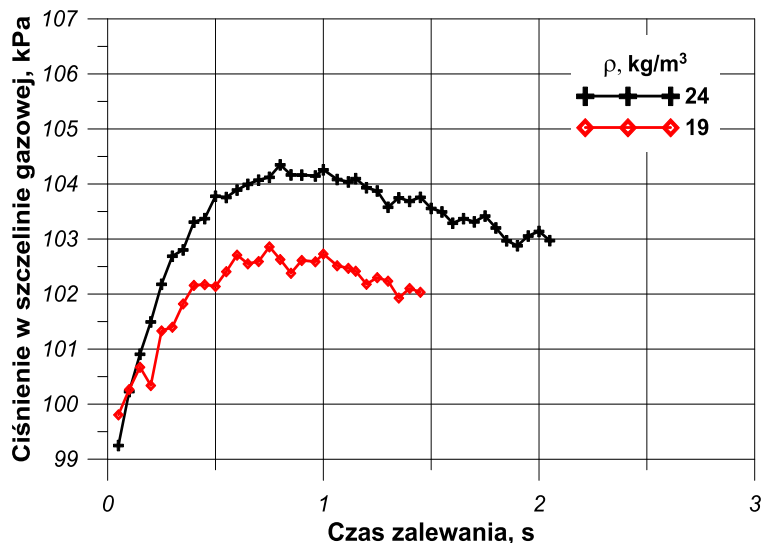
Rys. 3.12. Rzeczywisty przebieg zmian prędkości zalewania w zależności od gęstości modelu styropianowego dla siluminu, temperatura zalewania  $T=973\text{ K}$ .



Rys. 3.13. Rzeczywisty przebieg zmian prędkości zalewania w zależności od gęstości modelu styropianowego dla żeliwa, temperatura zalewania  $T=1673\text{ K}$ .

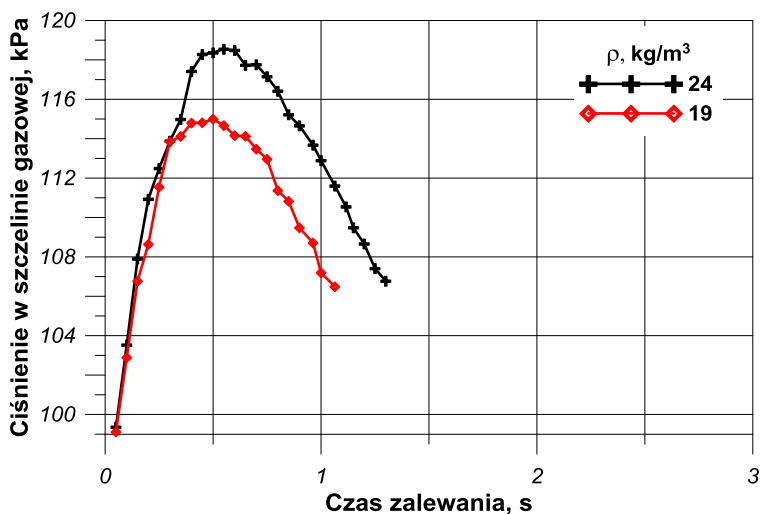
Dla przykładu, przy gęstości modelu styropianowego  $17\text{ kg/m}^3$  maksymalna prędkość podnoszenia się metalu we wnęce formy w przypadku żeliwa jest prawie dwukrotnie większa niż dla stopu aluminium.

Na rysunku 3.14 i 3.15 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian ciśnienia w szczelinie gazowej dla różnych gęstości modelu styropianowego.



Rys. 3.14. Przebieg zmian ciśnienia w szczelinie gazowej przy zalewaniu formy siluminem dla różnych gęstości modelu.

Z rys. 3.14 wynika, że wraz ze zwiększeniem gęstości modelu następuje wzrost ciśnienia w szczelinie gazowej. Dla badanych gęstości modelu zaobserwowano wzrost ciśnienia o 1 kPa w przypadku zalewania formy siluminem. Znacznie większe ciśnienia w szczelinie gazowej uzyskuje się przy wypełnianiu formy żeliwem, co przedstawiono na rysunku 3.15. Przykładowo, dla gęstości modelu styropianowego 24 kg/m<sup>3</sup> ciśnienie gazów w szczelinie wynosi około 119 kPa. Występowanie większego ciśnienia jest spowodowane wyższą temperaturą zalewania żeliwa i powstawaniem większej ilości gazowych produktów rozkładu polistyrenu.



Rys. 3.15. Przebieg zmian ciśnienia w szczelinie gazowej przy zalewaniu formy żeliwem dla różnych gęstości modelu.

Ponadto, wykorzystując opisane powyżej stanowisko badawcze, można prowadzić doświadczenia umożliwiające badanie wpływu wielkości podciśnienia w formie, przepuszczalności i grubości pokrycia ogniotrwałego, rodzaju stopu, temperatury zalewania na przebieg wypełnienia wnęki formy, a więc na prędkość wypełniania wnęki formy i ciśnienia w szczelinie gazowej.

## **4. PODSTAWY TECHNOLOGICZNE PROCESU PEŁNEJ FORMY**

Ogólną charakterystykę technologii produkcji odlewów metodą pełnej formy przedstawiono w rozdziale 1.2. W bieżącym rozdziale omówiono wybrane zagadnienia technologiczne procesu pełnej formy. Jednym z najistotniejszych etapów w procesie pełnej formy jest wytwarzanie modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych. Warunkiem niezbędnym otrzymania odlewów o dużej dokładności i gładkości powierzchni jest wysoka jakość modelu oraz mała gęstość modelu ze spienionego polimeru. Poniżej opisano procesy wytwarzania modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych zarówno dla produkcji jednostkowej, jak i produkcji seryjnej i wielkoseryjnej. Przedstawiono również technologię wytwarzania zestawów modelowych, rodzaje pokryw ogniotrwałych i metody ich nanoszenia. Omówiono sposoby formowania zestawów modelowych w suchych piaskach formierskich bez lepiszcza oraz przedstawiono formowanie w masach chemoutwardzalnych wraz z przykładowymi odlewami dużych korpusów żeliwnych. Przedstawiono również badania procesu wstępnego spieniania oraz badania kształtowania modelu poprzez spiekanie w autoklawie, które przeprowadzono w Katedrze Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej.

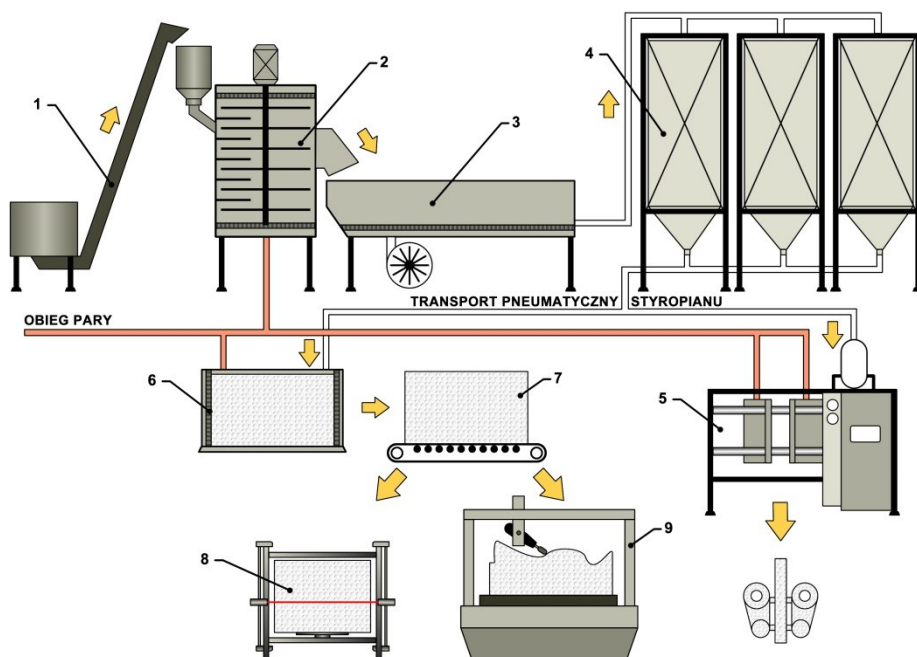
### **4.1. Proces wytwarzania modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych**

Proces wytwarzania modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych składa się z dwóch etapów technologicznych:

- wstępnego spieniania,
- kształtowania końcowego modelu.

W pierwszym, tzw. wstępnym spienianiu, granulki spienianego polimeru, np. polistyrenu, poddaje się wstępnej obróbce cieplnej, suszeniu zwykle fluidyzacyjnym oraz sezonowaniu – aktywacji. W drugim etapie kształtowania modelu zapełnia się matrycę wstępnie spienionymi i wysezonowanymi granulkami, poddając je w jej wnętrzu obróbce cieplnej, a następnie po schłodzeniu wyjmuje się gotowy model.

Na rysunku 4.1 przedstawiono schematycznie podstawowe procesy związane z różnymi sposobami wytwarzania modeli styropianowych używanych w procesie zgazowywanych modeli (EPC). Spienialny polimer, najczęściej spienialny polistyren, podawany jest przenośnikiem 1 do spieniarki 2 (cyklicznej bądź ciągłej) i poddawany procesowi wstępnego spieniania za pomocą pary wodnej. Proces wstępnego spieniania odbywa się w komorze spieniarki.



*Rys. 4.1. Schemat wytwarzania modeli styropianowych dla procesu lost foam:  
1 – podajnik polistyrenu spienialnego, 2 – speniarka ciągła lub cykliczna,  
3 – suszarka fluidyzacyjna, 4 – silosy, 5 – automat, 6 – forma blokowa, 7 – blok  
styropianowy, 8 – płoter termiczny, 9 – obrabiarka CNC.*

Po spienieniu granulat jest poddawany suszeniu w suszarce fluidyzacyjnej 3, a następnie transportem pneumatycznym podawany do silosów 4, gdzie jest sezonowany. W zależności od wielkości produkcji możliwe jest wytwarzanie modeli w metalowych matrycach w autoklawach lub automatach 5 do wytwarzania modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych (dla produkcji seryjnej) bądź wycinanie modeli z bloków styropianowych 7 wytwarzanych w dużych formach blokowych 6 na ploterach termicznych 8 lub obrabiarkach sterowanych numerycznie 9 (dla produkcji małoseryjnej i jednostkowej). Poszczególne etapy procesu

wytwarzania modeli, jak i urządzenia w nich używane zostaną szczegółowo omówione w dalszej części rozdziału.

Poszczególne etapy procesu wytwarzania modeli, jak i urządzenia w nich używane zostaną szczegółowo omówione w dalszej części rozdziału.

#### 4.1.1. Wymagania stawiane modelom ze spienionych polimerów

Modele ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych wykorzystywane w odlewnictwie w procesie pełnej formy powinny zapewniać:

- odpowiednią gęstość, w zależności od stopu, jakim są zalewane ( $16 \div 27 \text{ kg/m}^3$ ),
- wytrzymałość mechaniczną, ( $R_g = 0,3 \div 0,35 \text{ MPa}$ ),
- dobrą jakość powierzchni, małą chropowatość i dużą dokładność wymiarowo-kształtową,
- stabilność wymiarową,
- nie powinny pozostawiać części stałych po gazyfikacji,
- odpowiednią szybkość gazyfikacji,
- być przyjazne dla środowiska,
- niską cenę.

Modele w znacznym stopniu spełniające te wymagania to modele styropianowe (EPS).

#### 4.1.2. Materiały stosowane na modele

Jednym z najczęściej stosowanych materiałów do wytwarzania modeli wykorzystywanych w odlewnictwie jest *polistyren spieniony (EPS)*, powszechnie znany pod nazwą styropian. Jest on polimerem termoplastycznym wytwarzanym w postaci drobnych granulek nasyconych poroforem ( $1 \div 8\%$ ). Na potrzeby odlewnicze granulacja materiału powinna być rzędu  $0,20 \div 0,33 \text{ mm}$ , by po spienieniu średnica granulki wynosiła odpowiednio  $0,60 \div 1,5 \text{ mm}$  przy gęstości ok.  $23 \text{ kg/m}^3$  [1, 36].

Porofor znajdujący się wewnątrz granulki w podwyższonej temperaturze wrze lub rozkłada się, wydzielając produkty gazowe:  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  oraz  $\text{NH}_3$ . W zależności od mechanizmu spieniania można wyodrębnić dwa rodzaje poroforów: chemiczne –

które w wyniku rozkładu wydzielają produkty gazowe powodujące spienienie tworzywa oraz fizyczne – zmieniające jedynie jego stan skupienia. Porofozy fizyczne są to: ciecze, ciała stałe oraz gazy rozpuszczone pod ciśnieniem w tworzywie, które w wyniku podwyższonej temperatury odparowują. W produkcji polistyrenu spienialnego najczęściej wykorzystywanym poroforem jest pentan. W celu zapewnienia odpowiedniej szybkości gazyfikacji modelu styropianowego do polistyrenu w procesie jego syntezy dodaje się środki ułatwiające termiczną destrukcję polimeru.

Modele ze spienionego polistyrenu mają również pewne wady, m.in. małą stabilność wymiarową, przypisywaną stopniowej utracie środka spieniającego podczas ich przechowywania [37, 38]. Podczas zalewania form w wyniku destrukcji termicznej modelu styropianowego, powstają toksyczne gazy (grupy aromatyczne), co skłania do poszukiwania materiałów bardziej przyjaznych i ekologicznych dla środowiska [39, 40, 41].

Zalecaną gęstość modeli ze spienionego polistyrenu przedstawiono w tabeli 4.1.

*Tabela 4.1. Zalecane gęstości modeli styropianowych dla niektórych stopów odlewniczych*

| Rodzaj stopu    | Temperatura zalewania, °C | Gęstość modelu z EPS, kg/m <sup>3</sup> |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| Stopy aluminium | 705÷790                   | 24-27                                   |
| Stopy miedzi    | 1040÷1260                 | 20-21,6                                 |
| Żeliwo szare    | 1370÷1455                 | ≤20                                     |
| Staliwo         | 1595÷1650                 | ≤17,6                                   |

Innym materiałem stosowanym w technologii pełnej formy, w szczególności dla stopów żelaza, jest spienialny **polimetakrylan metylu (PMMA)** [42÷45]. Modele produkowane z polimetakrylanu metylu charakteryzują się podwyższoną stabilnością wymiarową oraz powodują mniejsze nawęglanie stopów żelaza. Różnica między monomerem PMMA a EPS jest taka, że ten pierwszy zawiera pięć atomów węgla, a drugi osiem. Ponadto polimetakrylan metylu zawiera atomy tlenu, które łatwo są uwalniane i łączą się z węglem podczas rozpadu cieplnego. PMMA nie posiada również pierścieni benzenowych, które są bardzo trwałe i trudno ulegają destrukcji cieplnej.

Polimetakrylan metylu rozkłada się intensywnie w procesie depolimeryzacji, a produkty rozpadu są gazami szybko ulatniającymi się z przestrzeni zalewania. Nawęglanie odlewów stalowych z wykorzystaniem modeli z PMMA wynosi około 0,05%, natomiast wykonanych z EPS 0,1÷0,3% [46, 47, 48].

Podczas rozkładu spienialnego polistyrenu występuje mechanizm zwany „przypadkowym rozkładem”, w którym wiązania C-C w łańcuchu polimeru rozbijane są w różnych miejscach. Sprzyja to powstaniu dużych ilości ciekłych produktów (około 60%), w przypadku PMMA jest ich około 40% [33].

W tabeli 4.2. przedstawiono wybrane parametry fizyczne polistyrenu (EPS) i polimetakrylanu metylu (PMMA).

*Tabela 4.2. Parametry fizyczne podstawowych polimerów stosowanych w procesie pełnej formy [49]*

|                                                                    | <b>EPS</b> | <b>PMMA</b> |
|--------------------------------------------------------------------|------------|-------------|
| <b>Temperatura zeszklenia, °C</b>                                  | 80 do 100  | 105         |
| <b>Temperatura zapadania się granulek, °C</b>                      | 110 do 120 | 140 do 200  |
| <b>Temperatura topienia, °C</b>                                    | 160        | 260         |
| <b>Temperatura początku parowania, °C</b>                          | 275 do 300 | 250 do 260  |
| <b>Temperatura intensywnego parowania, °C</b>                      | 400 do 420 | 370         |
| <b>Temperatura końca parowania, °C</b>                             | 460 do 500 | 420 do 430  |
| <b>Ciepło polimeryzacji, J/g</b>                                   | 648        | 578         |
| <b>Ciepło degradacji, J/g</b>                                      | 912        | 842         |
| <b>Objętość wydzielanego gazu w temp. 750°C, cm<sup>3</sup>/g</b>  | 230        | 273         |
| <b>Objętość wydzielanego gazu w temp. 1300°C, cm<sup>3</sup>/g</b> | 760        | 804         |
| <b>% polimeru przekształconego w lepki osad</b>                    | 84         | 50          |
| <b>% nielotnych pozostałości w temp. 1400°C</b>                    | 15         | 3           |

Pomimo że spienialny polimetakrylan metylu znacznie przewyższa swoimi właściwościami polistyren, ze względu na swoją cenę jest zdecydowanie rzadziej stosowany. Obecnie został już opracowany środek utleniający, zwany STYROTHANE, będący roztworem wodnym nitroalkoholowym, który po wprowadzeniu do modeli styropianowych w odpowiednich proporcjach pozwala dostosować ilość tlenu do ilości węgla wydzielanego przy rozkładzie modeli z EPS [50].

Prowadzono również badania z wykorzystaniem modeli ze spienionych poliolefinów, zarówno *spienionego polietylenu (PE)*, jak i *spienionego polipropylen (PP)* [51]. Polietylen (PE) i polipropylen (PP) nie zawierają aromatycznej grupy. Modele odlewnicze wykonane ze spienionego PE lub PP mogą zostać przed zalewaniem usunięte przez rozpuszczenie albo przez spopielenie [1]. Jednakże te technologie nie są opłacalne i zaprzeczają korzyściom płynącym z technologii pełnej formy. Zastosowanie modeli z poliolefinów do produkcji odlewów staliwnych powoduje zmniejszenie wad spowodowanych nawęglaniem.

Prowadzono próby z zastosowaniem modeli ze spienialnego *poliwęglanu (PC)* [49]. Modele wykonane ze spienialnego poliwęglanu wykazują wiele zalet, m.in.: podwyższoną wytrzymałość mechaniczną, podczas zalewania metalem tworzywo rozpada się na  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ , nie pozostawiając popiołu. Jednak niska temperatura mięknięcia spienionego poliwęglanu dyskwalifikuje go z zastosowania w produkcji seryjnej, ponieważ wymagało by to dodatkowych operacji chłodzenia piasku obiegowego.

Analiza przydatności przedstawionych materiałów stosowanych na modele do procesu pełnej formy pozwala na stwierdzenie, że zarówno właściwości, jak i niska cena modeli ze spienionego polistyrenu zdecydowały o powszechnym zastosowaniu tego materiału. W związku z tym w dalszej części pracy zarówno proces wstępnego spieniania, jak i kształtowania modelu przedstawiono dla polistyrenu.

### 4.1.3. Proces wstępnego spieniania

Proces wstępnego spieniania jest realizowany w celu uzyskania określonej gęstości nasypowej spienialnego polimeru. Pod wpływem podwyższonej temperatury porofor znajdujący się wewnątrz granulki paruje, zwiększając jej objętość nawet do 60 razy. Najczęściej wykorzystywanym medium grzejnym w procesie wstępnego spieniania jest para wodna, która oprócz podgrzewania poroforu do temperatury wrzenia dodatkowo nawilża ścianki granulatu, dzięki temu są one bardziej elastyczne. W procesie jako medium grzejne może być również wykorzystana wrząca woda, prądy o wysokiej częstotliwości lub promieniowanie podczerwone [52].

Podstawowymi parametrami procesu są: czas i temperatura wstępnego spieniania. W praktyce zdecydowanie prościej jest sterować ciśnieniem nasyconej pary, które odpowiada żądanej temperaturze spieniania, a wartość ciśnienia ustala się z wykresu entalpii – entropii nasyconej pary wodnej. Wpływ podstawowych parametrów procesu wstępnego spieniania zostanie szerzej omówiony w dalszej części rozdziału.

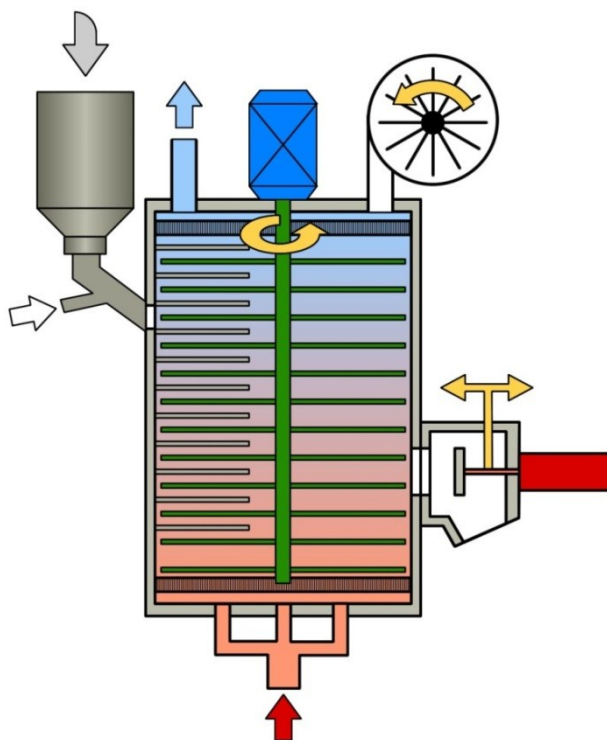
#### **4.1.3.1. Urządzenia do wstępnego spieniania**

Proces wstępnego spieniania przeprowadza się w urządzeniach zwanych spieniarkami.

W przemyśle wyodrębniły się dwa typy spieniarek, które ze względu na charakter pracy można podzielić na spieniarki do pracy cyklicznej oraz spieniarki do pracy ciągłej. Przebieg procesu spieniania w obu spieniarkach różni się tym, że w spieniarce o pracy ciągłej spieniany granulát podawany jest permanentnie i tak odbierany, a w spieniarkach cyklicznych do komory spieniarki zasypuje się określoną ilość granulatu i po spienieniu całość wysypuje ze spieniarki.

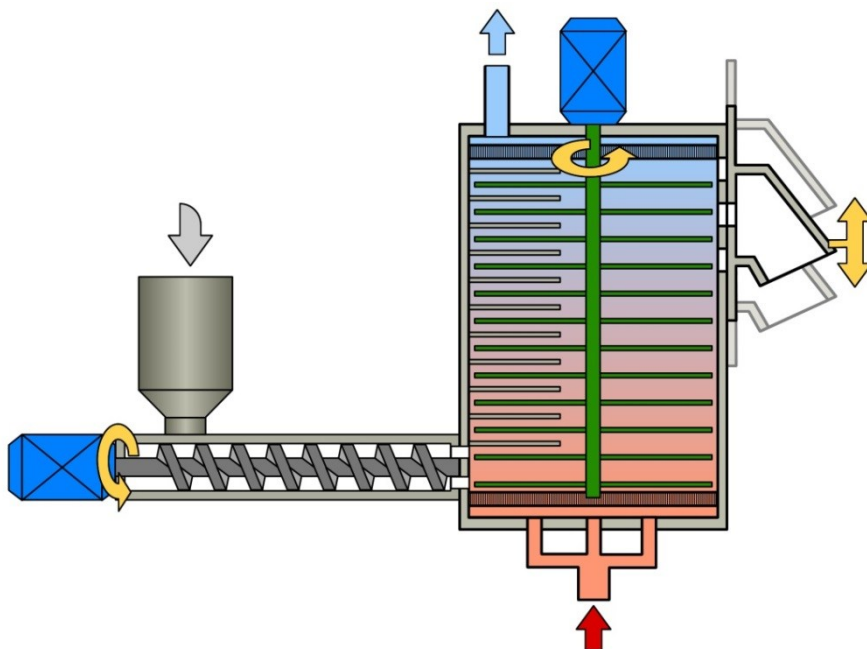
W spieniarce cyklicznej do komory spieniania z zasobnika umieszczonego powyżej zostaje wprowadzona określona porcja granulatu. Podczas procesu komora spieniania jest zamknięta, by zapewnić utrzymanie stałego ciśnienia, co gwarantuje równomierne spienienie granulatu. W izolowanej komorze spieniania umieszczone są mieszadła, które mają zapobiegać zbryleniu się granulatu oraz zapewnić równomierne spienienie granulatu. Do komory spieniania dostarczana jest para wodna pod zadaniem ciśnieniem. Dla stabilności procesu komorę przed procesem powinno się wygrzać do temperatury ok. 90°C. Po zakończonym procesie spieniania komorę spieniania łączy się z atmosferą, a wentylator przedmuchiwa spienione granulki styropianu do suszarni fluidyzacyjnej.

Na rysunku 4.2 przedstawiono schemat komory spieniarki cyklicznej.



*Rys. 4.2. Schemat budowy spieniarzki do pracy cyklicznej.*

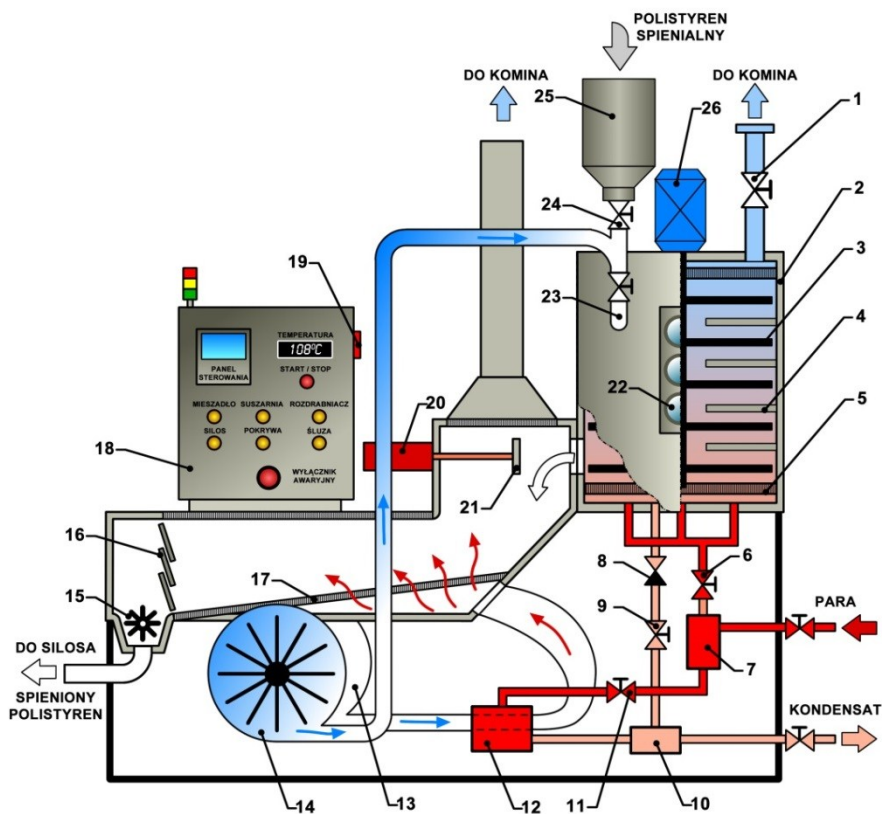
W spieniarce do pracy ciągłej granulat jest dostarczany do dolnej części komory spieniania podajnikiem ślimakowym w sposób nieprzerwany. Podobnie jak w spieniarce do pracy cyklicznej, do komory spieniania dostarczana jest para wodna. W wyniku działania pary wodnej i rozprężania się poroforu spieniany granulat unosi się do góry. W bocznej ścianie komory na różnych wysokościach znajdują się okna odbioru spienionego granulatu, przez które następuje wysyp granulatu. W zależności od wysokości okna, z którego odbiera się wstępnie spieniony granulat, uzyskuje się różne gęstości granulatu. Im wyżej znajduje się okno odbiorcze, tym gęstość wstępnie spienionego granulatu jest mniejsza. Gęstość wstępnie spienionego granulatu można również regulować ilością podawanego przez ślimak (prędkość obrotu ślimaka) niespionionego granulatu oraz ilością odbieranego z komory spieniania spienionego granulatu. Schemat budowy spieniarzki do pracy ciągłej został przedstawiony na rysunku 4.3.



*Rys. 4.3. Schemat budowy spieniarki do pracy ciągłej.*

Po zakończonym procesie wstępnego spieniania wstępnie spieniony granulat zostaje przesypywany do suszarki fluidyzacyjnej. Proces wysypu granulatu może być dodatkowo wspomagany przez nadmuch powietrza. Suszenie granulatu, poza funkcją suszenia, ma na celu obniżenie temperatury wstępnie spienionego granulatu oraz zapobieganie zlepianiu granulek. Suszarka fluidyzacyjna jest połączona bezpośrednio z nagrzewnicą pary oraz wentylatorem. Powietrze z wentylatora trafia do nagrzewnicy, a następnie poprzez perforowane dno suszarki kierowane jest do komory suszenia suszarki.

Na rysunku 4.4 przedstawiono schemat spieniarki do pracy cyklicznej SC-500 będącej na wyposażeniu Katedry Technologii Materiałowej i Systemów Produkcji Politechniki Łódzkiej.



Rys. 4.4. Schemat budowy spieniarki do pracy cyklicznej SC-500  
 1 – zawór otwarcia komina, 2 – komora spieniania z izolacją, 3 – mieszadło,  
 4 – pręty rozdrabniające, 5 – dno szczelinowe, 6 – zawór główny pary,  
 7 – naczynie odwadniające, 8 – zawór zwrotny kondensatu, 9 – zawór  
 kondensatu, 10 – zbiornik na kondensat, 11 – zawór nagrzewnicy,  
 12 – nagrzewnica parowa, 13 – wentylator suszarni, 14 – wentylator  
 przedmuchu, 15 – rozdrabniacz, 16 – śluza, 17 – perforowane dno suszarni,  
 18 – szafa sterownicza, 19 – wyłącznik główny, 20 – siłownik pneumatyczny  
 pokrywy, 21 – pokrywa wysypu, 22 – wziernik, 23 – zawór przedmuchu,  
 24 – zawór zasypu surowca, 25 – pojemnik zasypowy, 26 – silnik elektryczny  
 napędu mieszadła.

Spieniarka jest wyposażona w izolowaną termicznie komorę spieniania 2 o objętości 90 cm<sup>3</sup>. Na ścianie komory zainstalowany jest wziernik 22, który umożliwia obserwację procesu spieniania. Spieniarka pozwala w zależności od parametrów spieniania i rodzaju surowca uzyskiwać gęstości nasypowe styropianu od 15÷40 kg/m<sup>3</sup>. Sterowanie spieniarki opiera się na sterowniku

programowalnym firmy Mitsubishi umieszczonym w szafie sterowniczej 18, dzięki czemu proces spieniania może odbywać się całkowicie automatycznie i w sposób powtarzalny. Przebieg spieniania w cyklu automatycznym przebiega następująco. Po naciśnięciu przycisku start na szafie sterowniczej zaczyna obracać się mieszadło 3 napędzane silnikiem elektrycznym 26. Otwiera się zawór klapowy zasypu surowca 24 i polistyren spienialny EPS, znajdujący się w pojemniku zasypowym 25, zabierany jest poprzez dyszę pneumatyczną do komory spieniania. Następnie zostaje zamknięty zawór zasypu 24, zawór komina 1 oraz zawór kondensatu 9 i otworzony zawór główny pary 6. Para wodna jest dostarczana dopływem rozgałęzionym na trzy kanały do komory pod szczelinowym dnem 5, skąd następnie przechodzi do właściwej komory. Takie rozwiązanie ma na celu uzyskanie równomiernego strumienia pary. Komora spieniania wypełnia się parą wodną do nastawionej wartości ciśnienia. Następnie następuje przedmuch pary, przez określony czas i przy zadanym ciśnieniu. Naprzemiennie otwiera się i zamyka zawór komina i pary głównej. Po zakończeniu fazy parowania zamyka się zawór pary głównej i otwiera się zawór komina, a ciśnienie w komorze spieniania zmniejsza się do ciśnienia atmosferycznego. Rozpoczyna się faza wentylowania – załącza się wentylator przedmuchu oraz otwierają się zawory kondensatu i przedmuchu. Po przewentylowaniu komory kończy się cykl spieniania. Siłownik pneumatyczny 20 otwiera pokrywę wysypu 21 i granulki wstępnie spienionego polistyrenu zostają przetransportowane do komory suszenia. Następnie pokrywa wysypu się zamyka i włącza się wentylator suszarni. Powietrze ogrzewane jest w nagrzewnicy parowej 12 i podawane jest pod perforowane dno suszarni 17. Następuje suszenie fluidyzacyjne granulek styropianu. Po cyklu suszenia otwierana jest śluza 16 i uruchamiany jest rozdrabniacz 15, którego zadaniem jest rozbicie sklejonnych kawałków styropianu. Granulki styropianu zostają przetransportowane strumieniem powietrza do silosu granulatu, gdzie jest poddany procesowi aktywowania-sezonowania.

Niektóre stanowiska do wstępnego spieniania w spieniarce do pracy cyklicznej są wyposażone w układ czynnej kontroli gęstości nasypowej wstępnie spienianego polistyrenu. W układzie tym wstępnie spieniony granulat jest transportowany do zbiornika i przez odpowiedni czas suszony. Następnie wysuszony granulat podawany jest do pojemnika umieszczonego na wadze znajdującego się bezpośrednio pod zbiornikiem. Nadmiar styropianu jest zgarniany za pomocą listwy i dokonywany jest pomiar masy, która przeliczana jest na bieżąco na gęstość nasypową styropianu. W przypadku odchyień

zmierzonej gęstości granulatu od wymaganej, parametry wstępnego spienienia oraz suszenia są automatycznie korygowane.

Zastosowanie układu czynnej kontroli na spieniarkach do pracy cyklicznej przyczynia się do zautomatyzowania procesu oraz znacznych oszczędności wynikających z uzyskania właściwej gęstości nasypowej w danym cyklu spieniania.

Na rysunku 4.5 przedstawiono fotografię układu czynnej kontroli gęstości nasypowej styropianu współpracującego ze speniarką cykliczną, która znajduje się w zakładzie Schaumaplast – Organika w Łodzi.

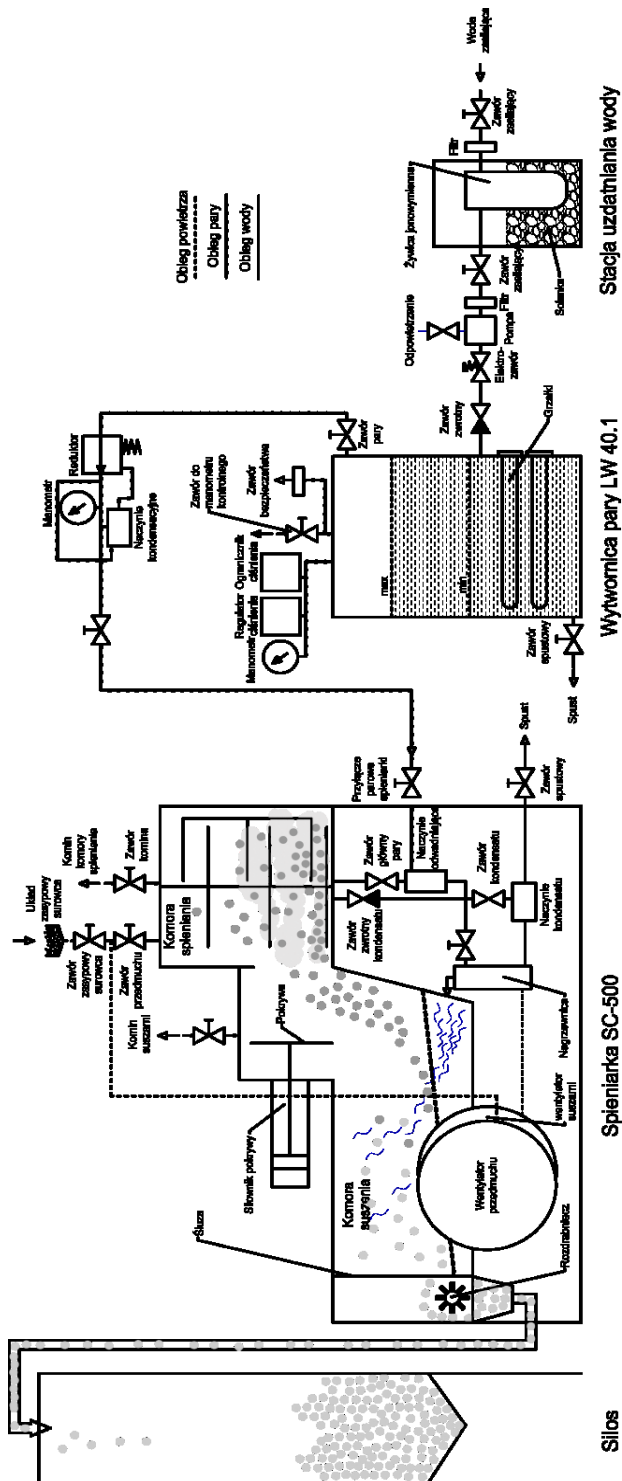


*Rys. 4.5. Stanowisko kontroli czynnej gęstości nasypowej styropianu.*

Omówiona speniarka do pracy cyklicznej SC-500 stanowiła podstawę do zaprojektowania i wykonania stanowiska doświadczalnego umożliwiającego kompleksowe badanie procesu wstępnego spieniania polimerów. W skład stanowiska do wstępnego spieniania przedstawionego na rysunku 4.6 wchodzi: stacja uzdatniania wody Epurosoft ES 37, wytwornica pary LW 40.1 firmy Prometr,

spieniarzka cykliczna SC-500 z suszarnią firmy GROM, połączona z wytwornicą pary poprzez reduktor ciśnienia bezpośredniego działania oraz silos służący do sezonowania spienionego polistyrenu.

Stacja uzdatniania wody to jonowymienny zmiękcacz wody składający się z kolumny ze złożem, zwanym żywicą jonowymienną, zbiornika solanki o pojemności 25 dm<sup>3</sup> i wielofunkcyjnej głowicy sterującej. Rozpuszczone w wodzie węglowodany wapnia i magnezu odpowiedzialne za twardość wody są wychwytywane w kolumnie wymiennika jonitowego zmiękcacza, podczas przepływu wody przez złożę. Po uzdatnieniu określonej ilości wody złożę traci swoje właściwości. Regeneracja nasyconym roztworem soli kuchennej (NaCl) przywraca żywicy pierwotne właściwości zmiękczające wodę. Wszystkie procesy w urządzeniu przebiegają automatycznie. Urządzenie pozwala na uzdatnienie do 0,8 m<sup>3</sup> wody na godzinę. Spieniarzka SC-500 przedstawiona na rysunku 4.4 jest podłączona z wytwornicą pary poprzez zawór redukcyjny i została omówiona powyżej. Spieniarzka pozwala w zależności od parametrów spieniania i rodzaju surowca uzyskiwać gęstości nasypowe styropianu od 15÷40 kg/m<sup>3</sup>. Po wysuszeniu i schłodzeniu granulki wstępnie spienionego polistyrenu zostają przetransportowane strumieniem powietrza do silosu, gdzie realizowany jest proces sezonowania-aktywowania. Fotografii rzeczywistego stanowiska wstępnego spieniania wyposażonego w spieniarzkę do pracy cyklicznej SC-500 przedstawiono na rysunku 4.7.

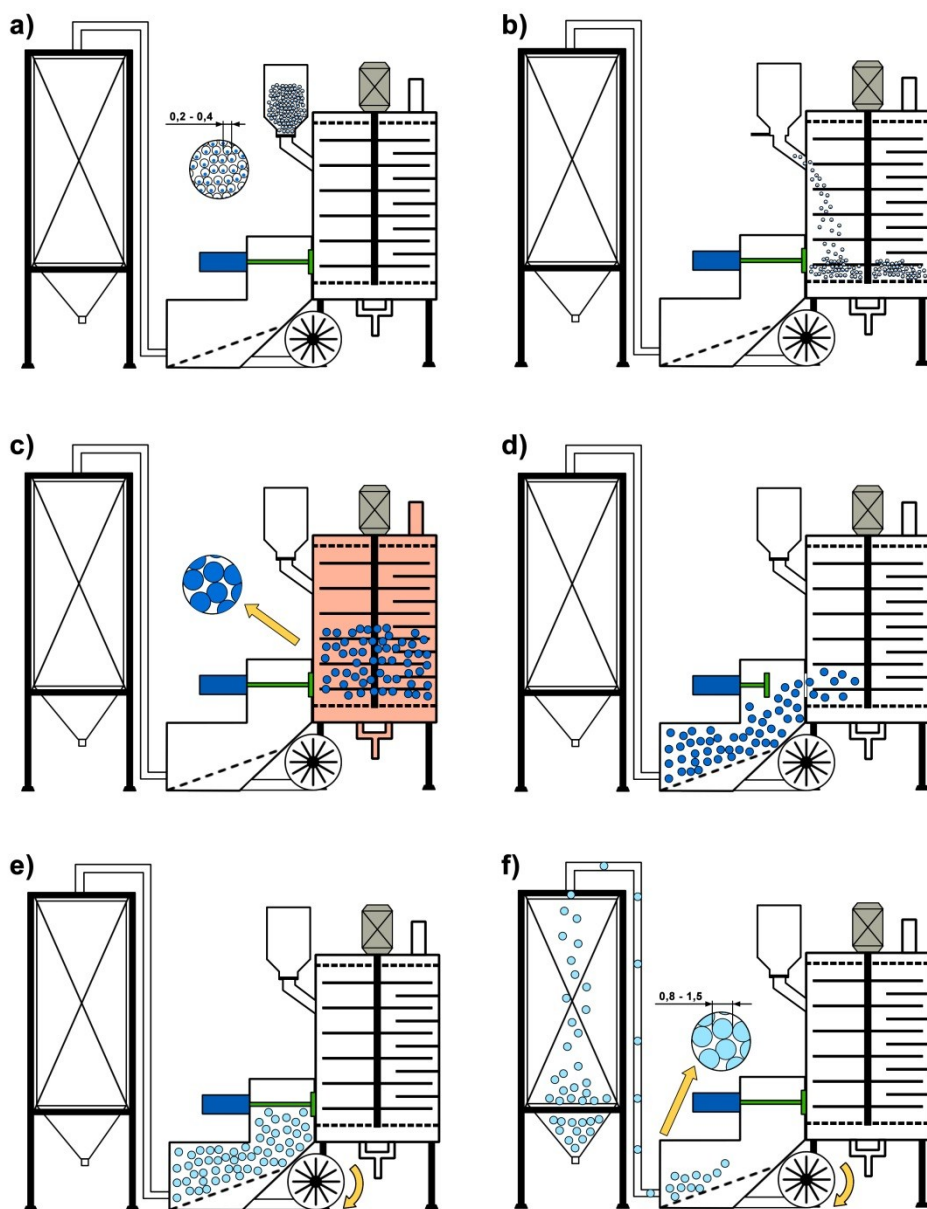


Rys. 4.6. Schemat stanowiska do wstępnego spieniania polistyrenu wyposażonego w spieniarzkę do pracy cyklicznej SC-500.



*Rys. 4.7. Fotografia spieniarki do pracy cyklicznej SC-500.*

Schemat wstępnego spieniania na spieniarce do pracy cyklicznej SC-500 przedstawiono na rysunku 4.8.



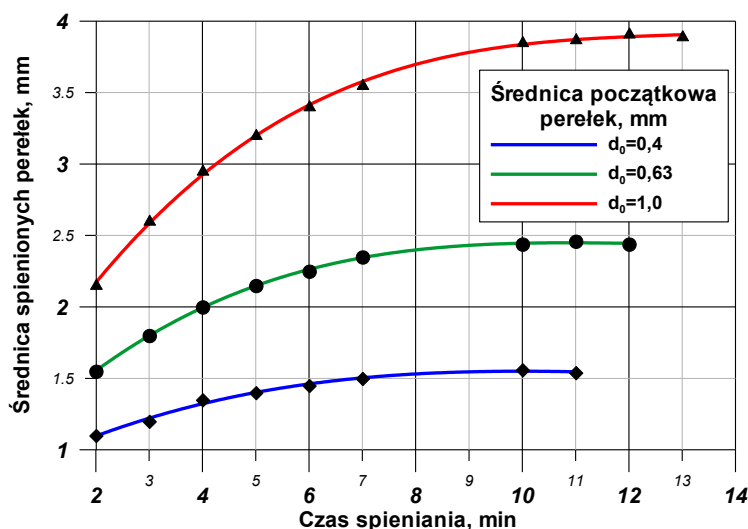
Rys. 4.8. Schemat procesu wstępnego spieniania na spieniarce CS-500:  
a) układ zasypowy z granulami polistyrenu spienialnego, b) wprowadzenie granulek do nagrzanej komory spieniania i zamknięcie komory, c) spienianie polistyrenu poprzez przedmuchiwanie komory parą, d) otwarcie komory, wentylacja i wysyp granulek do suszarni, e) zamknięcie komory i suszenie granulatu, f) transport styropianu do silosu.

Na stanowisku doświadczalnym przedstawionym powyżej przeprowadzono badania procesu wstępnego spieniania mające na celu zbadanie wpływu czasu i temperatury (ciśnienia) na gęstość nasypową wstępnie spienionego polistyrenu.

#### 4.1.3.2. Czynniki wpływające na proces wstępnego spieniania

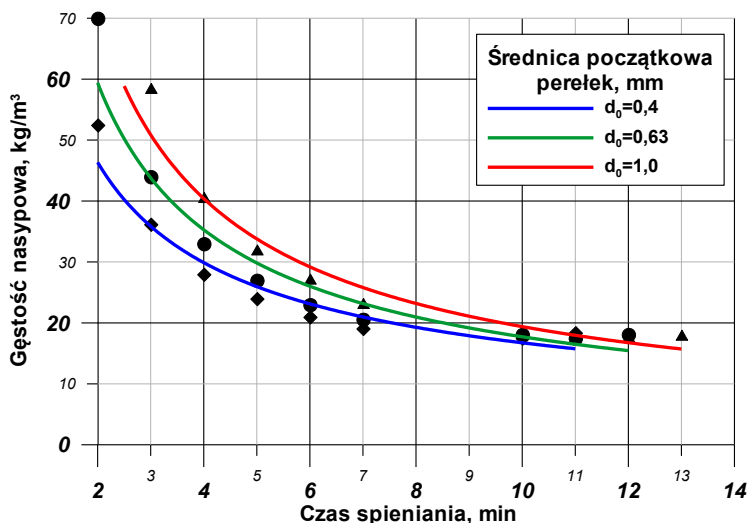
Na proces wstępnego spieniania mają wpływ głównie temperatura i czas spieniania, ilość poroforu, średnica początkowa granulek polistyrenu spienialnego, szybkość nagrzewania granulek, ciśnienie otaczającego środowiska [12, 53].

Wpływ czasu spieniania i średnicy początkowej granulek (perełek) styropianu na średnicę spienionych granulek przedstawiono na rysunku 4.9 [53].



Rys. 4.9. Zależność średnicy spienionych perełek od czasu spieniania i średnicy początkowej perełek EPS.

Wpływ gęstości nasypowej od czasu spieniania i średnicy początkowej granulek EPS przedstawiono na rysunku 4.10 [53].



Rys. 4.10. Zależność gęstości nasypowej od czasu spieniania i średnicy początkowej perelek EPS.

W rozdziale 4.1.3.3 przedstawiono wyniki badań procesu wstępnego spieniania, a w szczególności wpływu czasu i temperatury (ciśnienia) wstępnego spieniania na gęstość nasypową.

#### 4.1.3.3. Badania procesu wstępnego spieniania

Przeprowadzono badania wpływu ciśnienia (temperatury) pary w zakresie 1,15 do 1,4 bara oraz czasu spieniania w zakresie od 20 do 180 sekund na gęstość nasypową spienionego polistyrenu. W badaniach posługiwano się ciśnieniem pary, pomimo że spieniarka była wyposażona w termometr rezystancyjny Pt100, to jednak ze względu na zamocowanie go w obudowie komory spieniania charakteryzował się dużą bezwładnością. Temperaturę w komorze ustalano na podstawie wykresu entalpia-entropia dla pary wodnej nasyconej, w którym określonym wartościom ciśnienia pary wodnej jest przyporządkowana odpowiednia temperatura, co przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Ciśnienie-temperatura pary wodnej nasyconej

| Ciśnienie, bar  | 1,1 | 1,2   | 1,3   | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7   | 1,8   | 1,9   | 2     |
|-----------------|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| Temperatura, °C | 102 | 104,5 | 106,8 | 109 | 111 | 113 | 114,8 | 116,5 | 118,2 | 119,8 |

Do badań użyto trzy rodzaje polistyrenu spienialnego, których podstawowe właściwości przedstawiono w tabeli 4.4.

*Tabela 4.4. Rodzaje i parametry polistyrenów spienialnych stosowanych w badaniach*

|                                               | <b>STYROPOR<br/>F 495</b> | <b>STYROPOR<br/>P 426</b> | <b>D833B</b>   |
|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| <b>Producent</b>                              | BASF                      | BASF                      | NOVA Chemicals |
| <b>Gęstość nasypowa,<br/>g/cm<sup>3</sup></b> | 0,600                     | 0,600                     | 0,620          |
| <b>Granulacja, mm</b>                         | 0,4÷0,7                   | 0,4÷0,7                   | 0,3÷0,5        |
| <b>Zawartość poroforu</b>                     | 5,7%                      | 6,5%                      | 5,7%           |

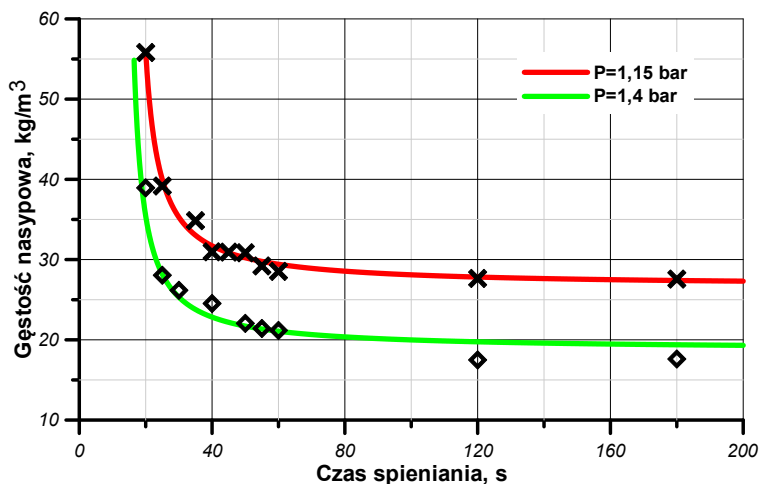
Badania realizowano w oparciu o opracowaną technologię procesu wstępnego spieniania. Po załączeniu spieniarki wygrzewano komorę reakcyjną do temperatury około 100<sup>0</sup>C. Następnie odmierzano polistyren spienialny w ilości 500 g i wsypywano go do leja zasypowego urządzenia. Uruchamiano proces wstępnego spieniania w cyklu automatycznym. Granulat zasypywano do komory spieniania w ciągu 10 s. Po ustalonym czasie spieniania komorę wentylowano przez 20 s i wysypywano polistyren do suszarko-chłodziarki fluidyzacyjnej przez 10 s. Po 300 s suszenia transportowano pneumatycznie wstępnie spienione granulki do silosu, w którym poddawano je sezonowaniu. Czas sezonowania w silosie wynosił 30 min. Po sezonowaniu określano gęstość nasypową. Następnie granulat przesiewano w celu wychwycenia grudek powstałych w wyniku sklejenia się granulek. Przesiany granulat wsypywano do zlewki o pojemności 3 l. Tak odmierzony surowiec ważono na wadze laboratoryjnej o dokładności ±0,02 g. Na podstawie danych masy oraz objętości obliczano gęstość granulek z danej próby.

Wyniki badań gęstości nasypowej polistyrenu w zależności od ciśnienia i czasu spieniania dla polistyrenu STYROPOR F 495 pokazano w tabeli 4.5.

*Tabela 4.5. Zależność gęstości nasypowej polistyrenu STYROPOR F 495 od czasu i ciśnienia spieniania*

| Gęstość nasypowa, kg/m <sup>3</sup> |     | Ciśnienie spieniania, bar |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-----|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                     |     | 1,15                      | 1,2   | 1,25  | 1,3   | 1,4   |
| Czas spieniania, s                  | 20  | 55,84                     | 53,88 | 48,16 | 47,96 | 38,97 |
|                                     | 25  | 52,1                      | 46,75 | 43,2  | 41,15 | 28,08 |
|                                     | 30  | 45,52                     | 43,57 | 36,92 | 35,48 | 26,2  |
|                                     | 35  | 34,88                     | 35,92 | 35,48 | 32,88 | 25,4  |
|                                     | 40  | 32,5                      | 35,3  | 34,4  | 30,28 | 24,56 |
|                                     | 45  | 30,96                     | 34,4  | 33,28 | 29,12 | 23,8  |
|                                     | 50  | 30,88                     | 32,77 | 32,36 | 28,16 | 22,08 |
|                                     | 55  | 29,24                     | 32,24 | 32,24 | 27,7  | 21,44 |
|                                     | 60  | 28,56                     | 30,93 | 31,28 | 27,16 | 21,2  |
|                                     | 120 | 27,68                     | 28,56 | 24,72 | 22,84 | 17,52 |
|                                     | 180 | 27,6                      | 26,8  | 23,28 | 21,41 | 17,64 |

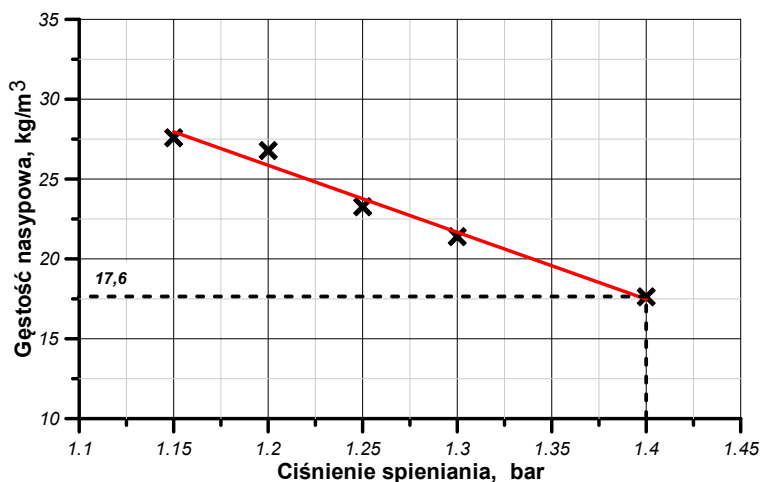
Na rysunku 4.9. przedstawiono wpływ czasu spieniania na gęstość nasypową polistyrenu dla dwóch wartości ciśnienia spieniania 1,15 i 1,4 bar.



*Rys. 4.11. Zależność zmian gęstości nasypowej polistyrenu od czasu spieniania dla ciśnienia spieniania 1,15 i 1,4 bar.*

Z rysunku 4.11 wynika, że wraz ze wzrostem czasu spieniania gęstość nasypowa maleje. Podobnie, im wyższe ciśnienie spieniania (wyższa temperatura spieniania), tym gęstość nasypowa spienionego polistyrenu jest mniejsza.

Wpływ ciśnienia spieniania na gęstość nasypową styropianu przedstawiono na rysunku 4.12. Badania przeprowadzono dla stałego czasu spieniania, wynoszącego  $t = 180$  s, dla którego uzyskano najniższą gęstość styropianu. Z danych przedstawionych w formie wykresu na rys. 4.12 wynika, że można uzyskać styropian o coraz mniejszej gęstości wraz ze wzrostem ciśnienia. Dla maksymalnego badanego ciśnienia spieniania, wynoszącego  $P = 1,4$  bar (temperatura pary wodnej dla takiego ciśnienia wynosi  $T=109^{\circ}\text{C}$ ), otrzymano gęstość styropianu  $\rho = 17,6 \text{ kg/m}^3$ .

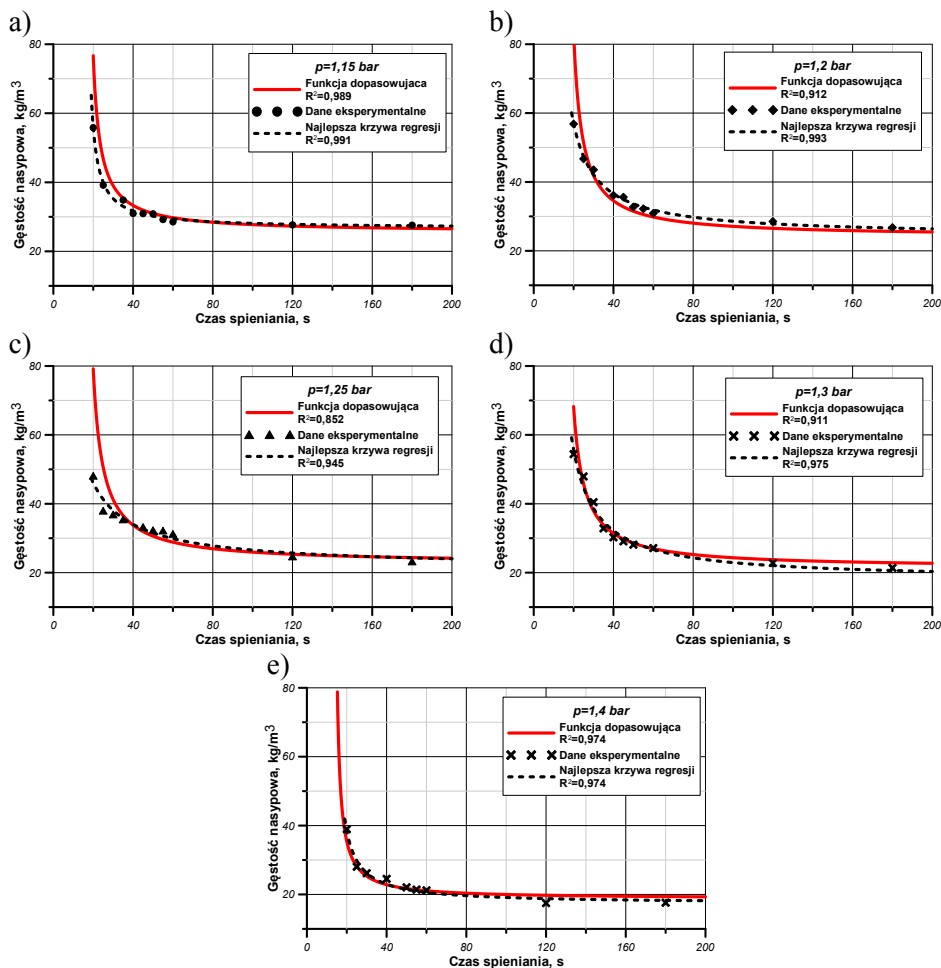


Rys. 4.12. Wpływ ciśnienia spieniania na gęstość styropianu przy stałym czasie spieniania  $t=180$  s.

Na rysunku 4.13 zestawiono wyniki badań gęstości styropianu w zależności od czasu i ciśnienia spieniania. Linia przerywaną przedstawiono linię trendu (krzywą dopasowania) będącą funkcją wymierną postaci:

$$\rho(t) = \frac{A}{C \cdot t - D} + B \quad (4.1)$$

gdzie: A, B, C i D – współczynniki wyliczane metodą najmniejszych sumy kwadratów.



Rys. 4.13. Wpływ czasu i ciśnienia spieniania na gęstość styropianu.

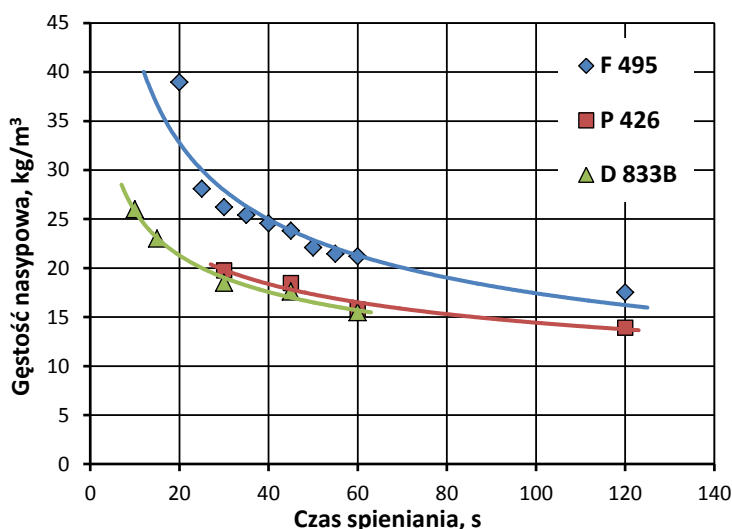
Przykładowo, dla ciśnienia  $p = 1,15 \text{ bar}$  (rys. 4.13a) współczynniki te wynoszą  $A = 22,154$ ,  $B = 26,647$ ,  $C = 0,181$ ,  $D = -2,864$  i są różne dla poszczególnych ciśnień spieniania. Współczynnik determinacji  $R^2$ , który jest miarą jakości dopasowania modelu, dla tych krzywych mieści się w granicach od 0,945 do 0,991.

Analiza wyników otrzymanych z doświadczeń pozwoliła na opracowanie zależności ujmującej wpływ czasu i ciśnienia spieniania na gęstość nasypową styropianu:

$$\rho(t, p) = \frac{-9493 \cdot p^2 + 23998 \cdot p - 14854}{0,9 \cdot p \cdot t - 17} + \frac{30}{p^p} \quad (4.2)$$

Zależność opisaną równaniem (4.2) przedstawiono na rysunku 4.13 za pomocą linii ciągłej. Dopasowanie funkcji do danych doświadczalnych jest dobre, o czym świadczą wartości współczynnika determinacji  $R^2$  powyżej 0,9.

Zestawienie zależności zmian gęstości nasypowej od czasu spieniania dla trzech przebadanych surowców przedstawiono na rysunku 4.14. Badania wykonano dla ciśnienia spieniania  $p = 1,4$  bar, przy którym najszybciej zmniejszała się gęstość nasypowa, a rozrost granulek był najintensywniejszy.



Rys. 4.14. Zestawienie zmian gęstości nasypowej badanych polistyrenów spienialnych dla stałego ciśnienia spieniania  $P=1,4$  bar.

Z analizy rysunku 4.14 wynika, że w przypadku polistyrenu spienialnego P 426 można uzyskać takie same gęstości nasypowe co dla F 495, w czasie dwa razy krótszym. Czas procesu skrócił się ze 120 s do 60 s, co ma duże znaczenie z punktu widzenia ekonomicznego, ale także ma wpływ na przebieg kolejnego etapu wytwarzania modeli styropianowych – spiekania. W przypadku polistyrenu spienialnego D833B, który posiadał mniejszą granulację od F 495, również uzyskano znaczne skrócenie procesu spieniania, choć zawartość porożu miał identyczną. Świadczy to, że na przebieg spieniania wpływ ma nie tylko czas i ciśnienie spieniania, zawartość porożu, ale także średnica początkowa

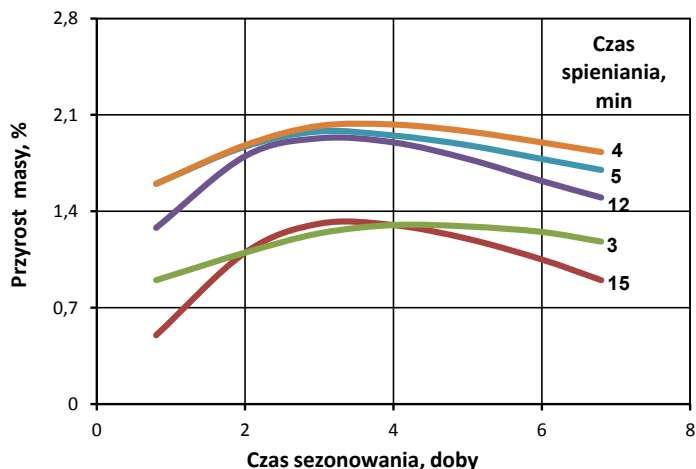
granulek. Z punktu widzenia przydatności do odlewania metodą Lost Foam zasadnym jest zastosowanie polistyrenu D833B, z którego można uzyskać styropian o gęstościach nasypowych  $15 \div 27 \text{ kg/m}^3$  dla czasów spieniania do 60 s, o średnicy granulek po spienieniu około 1 mm.

#### 4.1.4. Sezonowanie

Po zakończeniu wstępnego spieniania granulki suszy się i schładza, a następnie poddaje się procesowi sezonowania – aktywacji. Podczas sezonowania następuje dyfundowanie powietrza atmosferycznego do wnętrza granulek przez cienkie ścianki. Proces ten zachodzi dlatego, że we wnętrzu granulki panuje ciśnienie niższe od atmosferycznego, w wyniku skroplenia poroforu. Jednak z upływem czasu parujący porofor dyfunduje na zewnątrz granulki i w rezultacie masa granulek zmniejsza się, a zdolność do ponownego ekspandowania maleje. Czas sezonowania określa się indywidualnie dla każdego rodzaju surowca i jego gęstości i zwykle wynosi od pół godziny do kilku godzin. Sezonowanie przeprowadza się w materiałowych silosach. Materiał, z którego wykonuje się silosy, powinien posiadać właściwości przewiewne oraz antyelektrostatycznie. Konstrukcja nośna silosu jest najczęściej wykonywana z ocynkowanych rur stalowych, a jego pojemność uzależniona jest od wydajności spieniarki.

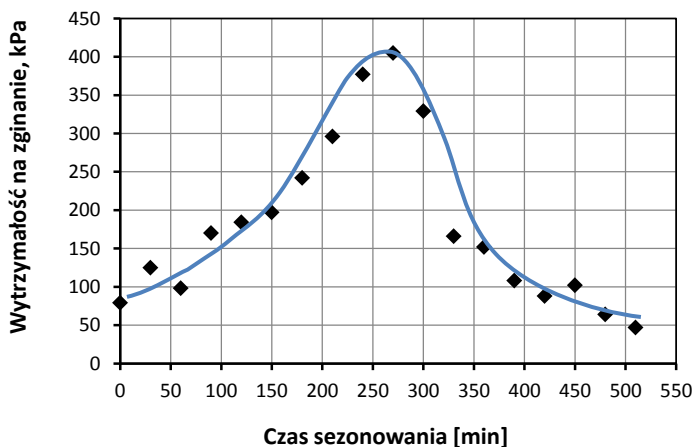
Wpływ czasu sezonowania na przyrost masy wstępnie spienionych granulek przedstawiono na rysunku 4.15 [12].

Odpowiedni czas sezonowania zapewnia maksymalną aktywność granulek, lecz w przypadku zbyt długiego sezonowania istnieje ryzyko obniżenia zawartości poroforu do takiej ilości, w której podczas kształtowania końcowego modelu nie nastąpi rozprężenie środka porotwórczego i spieczenie granulek. Zjawiska te mają istotny wpływ na aktywność granulek podczas kształtowania modelu w matrycy.

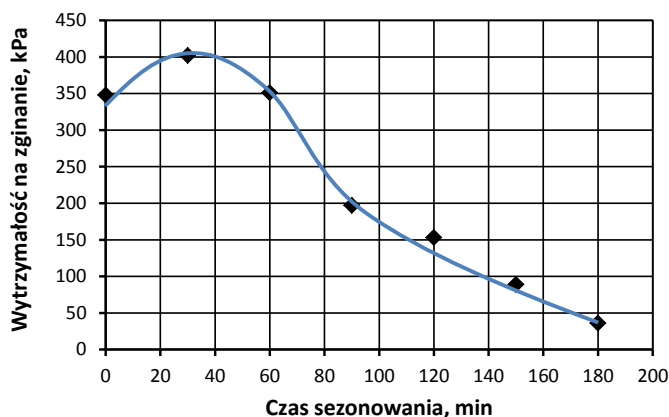


Rys. 4.15. Zależność przyrostu masy wstępnie spienionego polistyrenu od czasu sezonowania.

W KTMiSP prowadzono badania wpływu czasu sezonowania wstępnie spienionego polistyrenu na własności wytrzymałościowe. Wpływ czasu sezonowania polistyrenu D933B na własności wytrzymałościowe modelu przedstawiono na rysunku 4.16, zaś dla polistyrenu spienialnego D833B na rysunku 4.17.



Rys. 4.16. Wpływ czasu sezonowania wstępnie spienionego polistyrenu na wytrzymałość na zginanie dla polistyrenu D933B.



*Rys. 4.17. Wpływ czasu sezonowania wstępnie spienionego polistyrenu na wytrzymałość na zginanie dla polistyrenu D833B.*

Z analizy rysunku 4.16 i 4.17 wynika, że największą wytrzymałość na zginanie uzyskano w modelach wykonanych z wstępnie spienionego polistyrenu D933B sezonowanego około 5 godzin, a dla polistyrenu D833B sezonowanego około 1 godziny.

#### **4.1.5. Proces kształtowania modeli ze spienionych polimerów**

W procesie pełnej formy stosowanych jest wiele metod kształtowania modeli. Zależą one w głównej mierze od wielkości serii, skomplikowania modelu oraz tolerancji wymiarowych. Dla produkcji jednostkowej i małoseryjnej modele styropianowe wytwarzane są najczęściej przy użyciu obrabiarek sterowanych numerycznie CNC lub wycinane na ploterach termicznych. W produkcji seryjnej w procesie lost foam wykorzystuje się modele styropianowe wytwarzane w metalowych matrycach. Opis technologii kształtowania modeli oraz oprzyrządowania stosowanego do ich wytwarzania zostanie szerzej omówiony w dalszych rozdziałach.

##### **4.1.5.1. Proces kształtowania modeli dla produkcji seryjnej**

Proces kształtowania modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych jest prowadzony w specjalnie do tego celu zaprojektowanych matrycach, wykonanych najczęściej z aluminium lub jego stopów. Polega on na wypełnieniu wnętrza matrycy wstępnie spienionymi granulami i powtórным ich nagrzaniu za

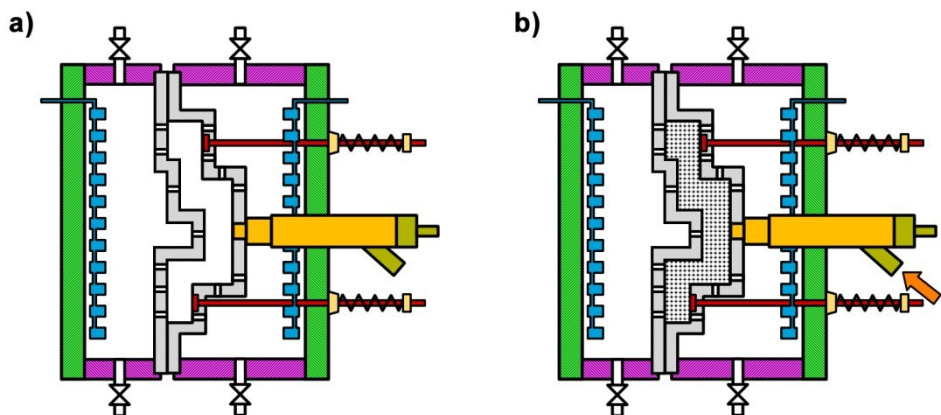
pomocą pary wodnej. W procesie powtórnego nagrzewania ponownie zachodzi ekspandowanie granulek, co powoduje zwiększenie ich ciśnienia. Ciśnienie granulek na ścianki matrycy znacząco wzrasta, a w temperaturze około 110<sup>0</sup>C następuje ich spiekanie [55]. Następnie matrycę i znajdujący się w niej ukształtowany model chłodzi się. Po schłodzeniu matrycę otwiera się i wyjmuje z niej model. W czasie przetrzymywania modelu na powietrzu, dyfunduje ono do wnętrza granulek, a jednocześnie zachodzi dyfuzja poroforu na zewnątrz granulki. Następuje niewielki wzrost sprężystości granulek, w wyniku napełnienia ich powietrzem, co w konsekwencji powoduje niewielki wzrost wytrzymałości modelu. Gęstość modelu musi być kontrolowana, ponieważ wpływa na takie własności, jak: wytrzymałość mechaniczna, gładkość powierzchni, ilość wytwarzanego gazu, skurcz i wymiary modelu [55]. Należy pamiętać, że gęstość modelu styropianowego zależy od gęstości nasypowej styropianu, z którego został wytworzony. Zależności gęstości modelu od gęstości nasypowej dla styropianu przedstawiono w tabeli 4.6

*Tabela 4.6. Wpływ gęstości nasypowej styropianu na gęstość modelu*

| Gęstość nasypowa polistyrenu, kg/m <sup>3</sup> | Gęstość modelu, kg/m <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 15,5                                            | 17,3                              |
| 17,6                                            | 19,6                              |
| 18,5                                            | 20,3                              |
| 23,1                                            | 25,2                              |
| 26,0                                            | 28,9                              |

W procesie kształtowania modelu z tworzyw wielkocząsteczkowych w matrycy wyróżniono cztery zabiegi: napełnianie, spiekanie, chłodzenie i wyjmowanie. Proces wytwarzania modeli w matrycach stosowanych w automatach przedstawiono schematycznie na rysunkach 4.18÷4.21.

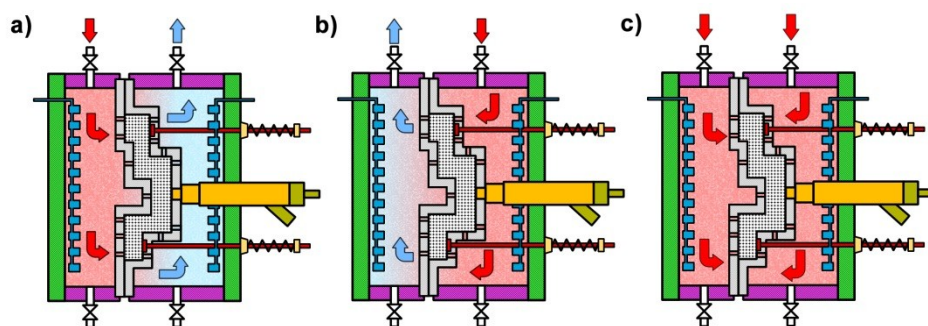
**Napełnianie** – przy użyciu specjalnego pistoletu napełniającego, wstępnie spienione, wysezonowane granulki tworzywa wdmuchiwane są do wnęki matrycy. Powietrze jako czynnik transportujący granulki tworzywa wpływa z matrycy powierzchnią podziału oraz korkami odpowietrzającymi. Dobre efekty daje zastosowanie podciśnienia podczas napełniania.



Rys. 4.18. Schemat napelniania matrycy w automacie:

a) pusta matryca, b) napelnienia matrycy granulkami styropianu przy użyciu pistoletu.

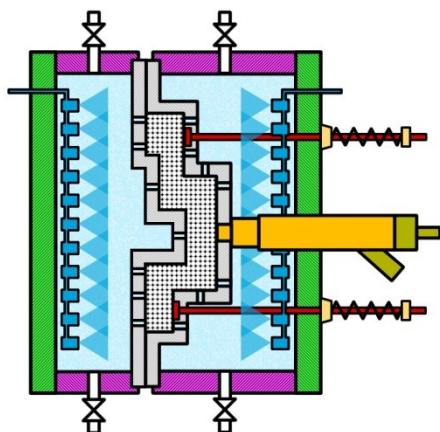
**Spiekanie** – po zapełnieniu wnętrza matrycy ciepło niezbędne do ogrzania matrycy i powtórznego nagrzania granulek tworzywa dostarczane jest przez parę wodną. Ponownie nagrzane granulki mięknią i ekspandują, wypełniając najpierw przestrzenie między sobą, a po ich zapełnieniu spiekają się razem ze sobą, przyjmując kształt wnętrza matrycy-modelu. Najbardziej wydajne procesy wytwarzania modeli realizowane są w matrycach wyposażonych w komory umożliwiające stosowanie pary, podciśnienia i zraszania wodą [6, 56, 57, 58, 59, 60]. Bardzo korzystne jest po nagrzaniu matrycy parą zastosowanie nagrzewania modelu bezpośrednio parą, najlepiej naprzemiennie, jak to przedstawiono na rysunku 4.19.



Rys. 4.19. Schemat spiekania modelu w matrycy:

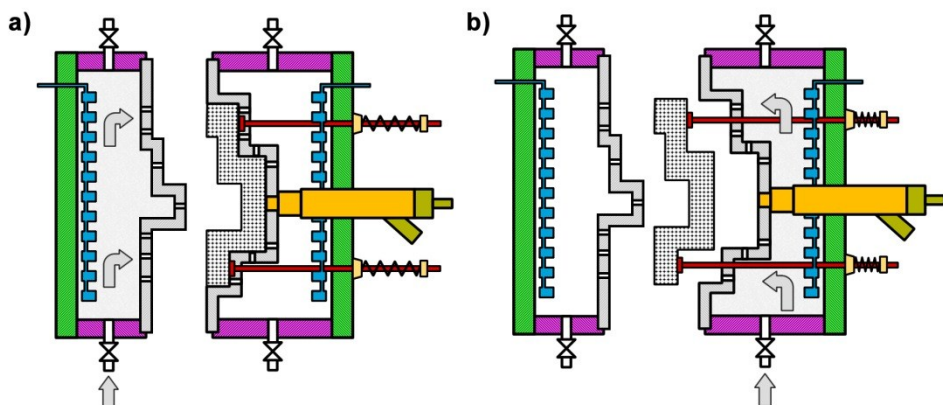
a) i b) naprzemienne przedmuchiwanie matrycy parą, c) jednoczesne doprowadzenie pary do obu połówek matrycy pod koniec procesu.

**Chłodzenie** – po spiekaniu w modelu panuje dość znaczne ciśnienie. Wyjęcie go z matrycy w tym stanie spowodowałoby niekontrolowane zwiększenie objętości i zmianę kształtu. Zjawisko to nazywane jest *postexpansion*. W celu jego wyeliminowania konieczne jest schłodzenie modelu jeszcze we wnęce matrycy. Chłodzenie realizowane jest zazwyczaj poprzez zraszanie wodą ścianek matrycy. Chłodzenie modelu w matrycy przedstawiono na rysunku 4.20.



Rys. 4.20. Schemat chłodzenia matrycy w automacie.

**Wymywanie** – po osiągnięciu przez model odpowiedniej temperatury, można go wyjąć z matrycy. W chwili usuwania modelu z matrycy jest on miękki i mało sprężysty, a więc bardzo podatny na odkształcenia. Dlatego ważne jest wybranie najodpowiedniejszego sposobu usunięcia go z matrycy. Z tego powodu zalecane są metody pneumatyczne lub kombinowane – pneumatyczne wraz z wypychaczami mechanicznymi. Wypychanie modelu z matrycy za pomocą sprężonego powietrza jest realizowane z wykorzystaniem istniejących w matrycy korków odpowietrzających. Schemat usuwania modelu z matrycy przedstawiono na rysunku 4.21.

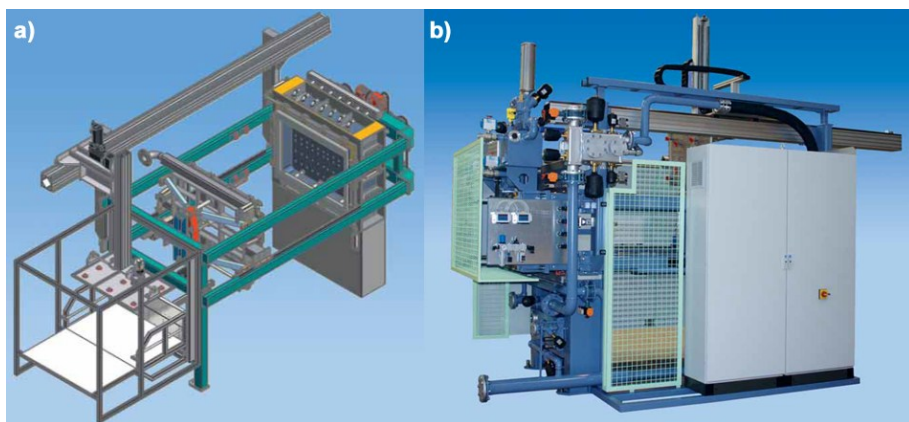


Rys. 4.21. Schemat wyjmowania modelu z matrycy automatu:  
a) otwarcie matrycy wspomagane sprężonym powietrzem, b) wypchnięcie modelu przez wypychacze wspomagane sprężonym powietrzem

Po wyjęciu modelu z matrycy zaleca się umieszczenie go w komorze próżniowej o ciśnieniu  $0,017 \pm 0,067$  MPa [59]. Zabieg ten powoduje zmniejszenie skurczu modelu styropianowego. Poza tym modele mogą być sezonowane w temperaturze około  $60^{\circ}\text{C}$  w celu przyspieszenia ich kurczenia.

#### 4.1.5.1.1. Urządzenia do kształtowania modeli poprzez spiekanie

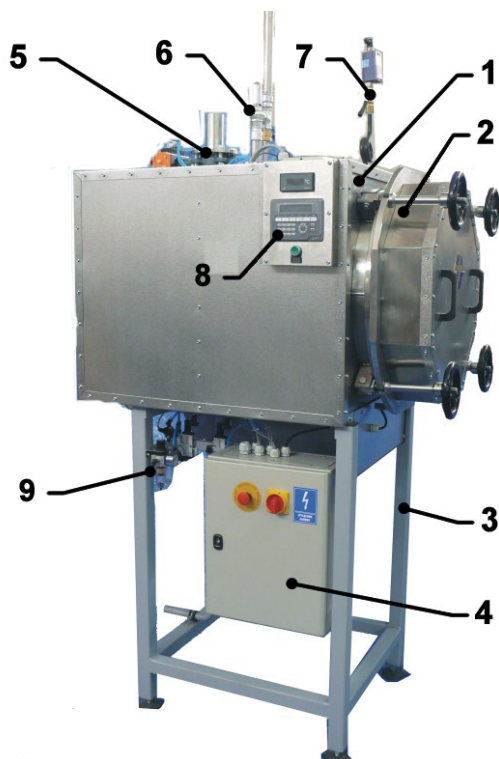
Do wytwarzania modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych dla procesu lost foam stosowane są formy metalowe, służące do kształtowania modeli styropianowych dwoma metodami. Pierwsza metoda polega na kształtowaniu-spiekaniu modeli w formach aluminiowych o konstrukcji pozwalającej na mocowanie ich na specjalnych urządzeniach, zwanych automatami. Druga metoda wytwarzania modeli styropianowych polega na kształtowaniu-spiekaniu modeli w formach aluminiowych, które umieszczane są w autoklawach. Konstrukcja form do wytwarzania modeli styropianowych na automatach została omówiona w rozdziale 5.1, zaś formy do autoklawów przedstawiono w rozdziale 5.3. Automat do kształtowania modeli styropianowych firmy HEITZ jest na wyposażeniu stanowiska produkcyjnego w firmie Schaumplast – Organica Sp. z o.o. w Łodzi.



*Rys. 4.22. Automat do kształtowania modeli styropianowych firmy HEITZ:  
a) schemat, b) widok rzeczywisty.*

Autoklaw będący na wyposażeniu laboratorium w Katedrze Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji PŁ służący do kształtowania modeli przedstawiono na rysunku 4.18.

Autoklaw A-600 firmy GROM może pracować w cyklu ręcznym i automatycznym, sterowany poprzez sterownik programowalny firmy Mitsubishi. W cyklu automatycznym można wyróżnić dwa tryby: przedmuchiwanie i cykliczny. Głównymi parametrami procesu kształtowania są ciśnienie i czas spiekania.



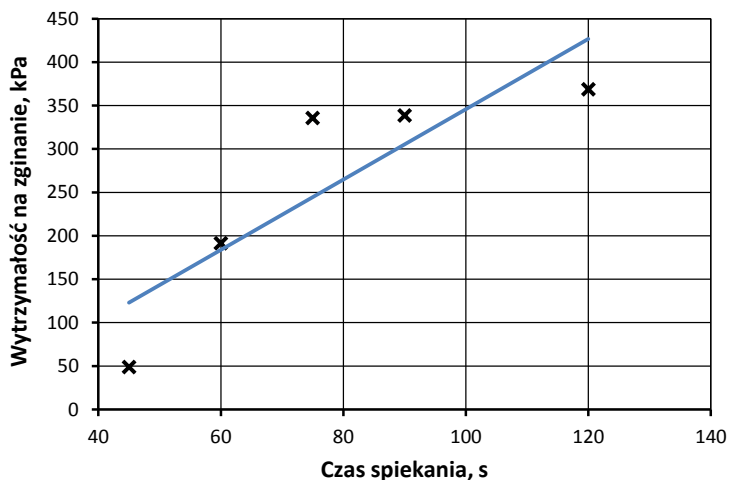
*Rys. 4.23. Autoklaw A-600*

*1 – korpus, 2 – drzwi, 3 – stojak, 4 – szafa sterownicza, 5 – komin z zaworem, 6 – czujnik ciśnienia, 7 – zawór bezpieczeństwa, 8 – pulpit operatorski, 9 – blok przygotowania powietrza.*

#### **4.1.5.1.2. Czynniki wpływające na proces spiekania modeli**

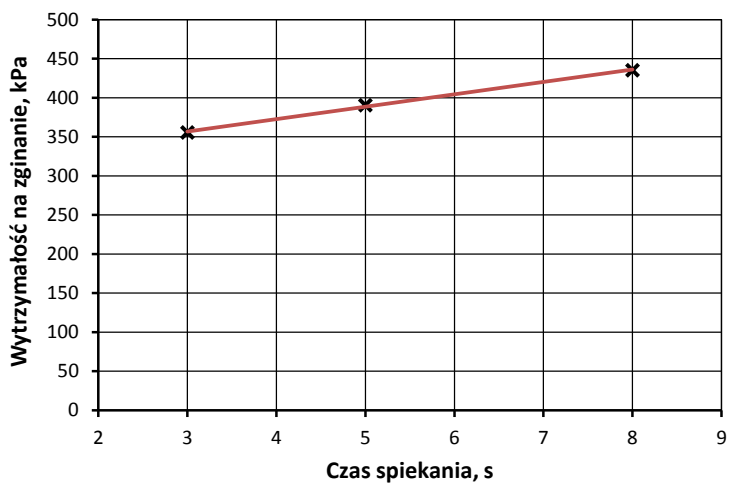
Podstawowymi parametrami procesu kształtowania modeli są: czas i temperatura procesu. Zarówno w autoklawach, jak i na automatach nastawianymi – programowanymi parametrami procesu spiekania jest czas i ciśnienie spiekania. Zadanemu ciśnieniu pary wodnej nasyconej ściśle odpowiada temperatura określona z entalpii-entropii pary wodnej.

Zależność wpływu czasu spiekania w autoklawie na własności wytrzymałościowe modelu styropianowego dla ciśnienia spiekania wynoszącego 2 bary przedstawiono na rysunku 4.24.



*Rys. 4.24. Wpływ czasu spiekania w autoklawie na wytrzymałość na zginanie modelu styropianowego.*

Wpływ czasu spiekania w automacie (przedmuchiwanie parą wodną) na własności wytrzymałościowe modelu styropianowego dla ciśnienia spiekania 2 bary przedstawiono na rysunku 4.25.



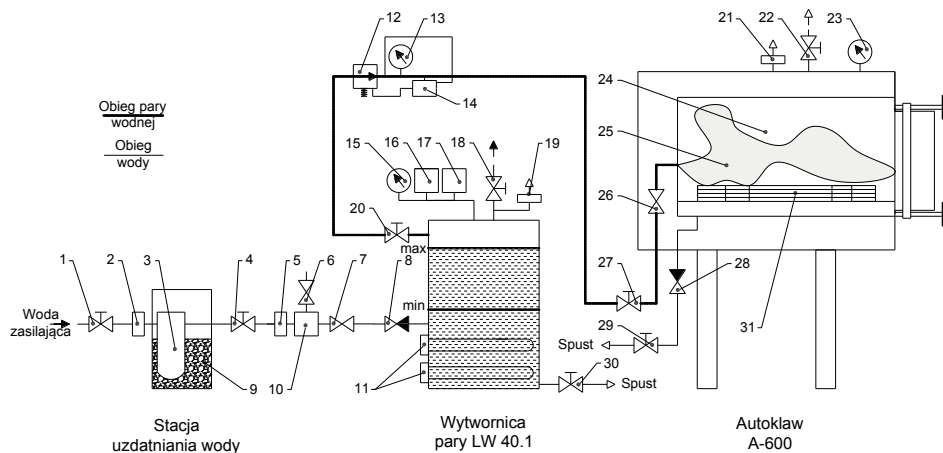
*Rys. 4.25. Wpływ czasu spiekania w automacie na własności wytrzymałościowe modelu styropianowego.*

Z analizy przedstawionych na rysunkach 4.24 i 4.25 zależności wynika, że czas spiekania na automatach jest kilkadziesiąt razy krótszy w stosunku do

czasu spiekania w autoklawach, przy osiągniętej pożądanej wytrzymałości na zginanie, około 300 kPa.

#### 4.1.5.1.3. *Badania procesu spiekania modeli w autoklawie*

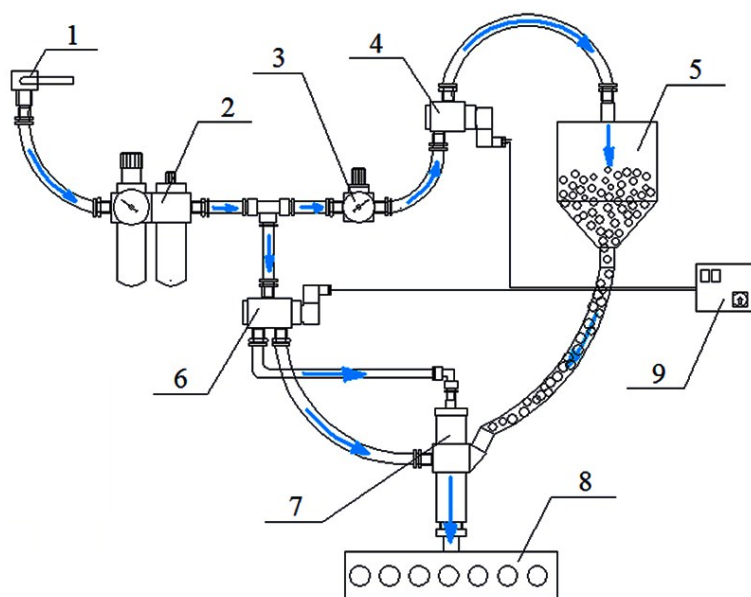
Badania procesu kształtowania modeli w autoklawach dla metody lost foam prowadzono na stanowisku doświadczalnym zaprojektowanym i wykonanym w KTMiSP Politechniki Łódzkiej. Jak już przedstawiono w rozdziale 4.1.5.1.2, podstawowymi parametrami mającymi wpływ na proces spiekania są czas i ciśnienie spiekania. Stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rysunku 4.26, umożliwia badania wpływu wymienionych parametrów na proces spiekania modeli styropianowych w autoklawie. W skład stanowiska wchodzi autoklaw typu A-600 firmy GROM, wytwornica pary LW 40.1, stacja uzdatniania wody firmy Epurosoft ES 37.



Rys. 4.26. Schemat stanowiska kształtowania modeli

- 1 – zawór zasilający, 2 – filtr, 3 – żywica jonowymienna, 4 – zawór, 5 – filtr, 6 – odpowietrzenie, 7 – elektrozawór, 8 – zawór zwrotny, 9 – solanka, 10 – pompa, 11 – grzałki, 12 – reduktor, 13 – manometr, 14 – naczynie kondensacyjne, 15 – manometr, 16 – regulator ciśnienia, 17 – ogranicznik ciśnienia, 18 – zawór manometru kontrolnego, 19 – zawór bezpieczeństwa, 20 – zawór pary, 21 – zawór bezpieczeństwa, 22 – zawór komina, 23 – manometr, 24 – komora kształtowania modelu, 25 – para wodna, 26 – zawór główny pary, 27 – przyłącze parowe autoklawu, 28 – zawór zwrotny kondensatu, 29 – zawór spustowy, 30 – zawór spustowy, 31 – matryca.

Prowadzone badania miały na celu określenie wpływu czasu i ciśnienia spiekania na wytrzymałość modelu na zginanie. Wytrzymałość na zginanie modeli prowadzono na modelach-kształtkach, które wykonywano w specjalnie zaprojektowanych matrycach ze stopów aluminium. Wypełnianie wnęk matryc prowadzono na zaprojektowanym i wykonanym specjalnym stanowisku do napełniania matrycy, przedstawionym na rysunku 4.27.



Rys. 4.27. Schemat stanowiska napełniania matrycowego wstępnie spienionym granulem

1 – zawór sprężonego powietrza, 2 – blok przygotowania powietrza, 3 – zawór redukcyjny, 4 – elektrozawór rozdzielający 3/2, 5 – zbiornik ciśnieniowy na granulat, 6 – elektrozawór rozdzielający 5/2, 7 – napełniacz (pistolet) do granulatu, 8 – matryca, 9 – pulpit sterowniczy.

Badania wytrzymałości na zginanie próbek styropianowych wg normy PN-EN 12089:2000 przeprowadzono na urządzeniu TS-1, którego fotografię przedstawiono na rysunku 4.28. Urządzenie pozwala na oznaczenie wytrzymałości na zginanie, ściskanie i rozciąganie.



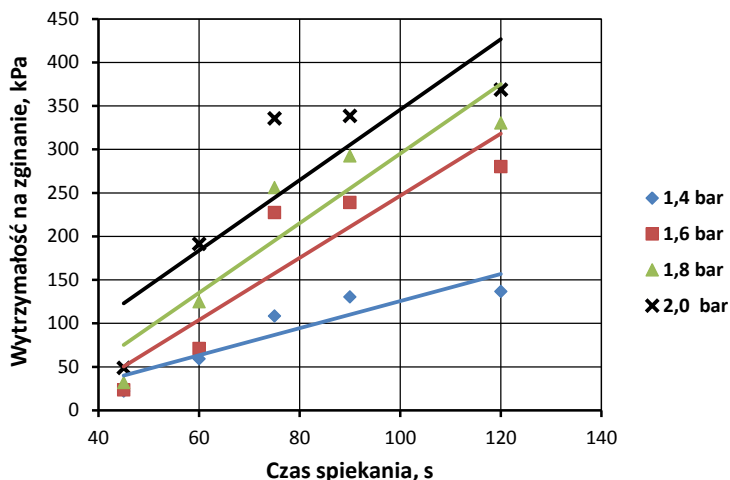
*Rys. 4.28. Aparat TS-1 do badania wytrzymałości na zginanie.*

Wyniki przeprowadzonych badań końcowego kształtowania modeli styropianowych przedstawiono w tabeli 4.7.

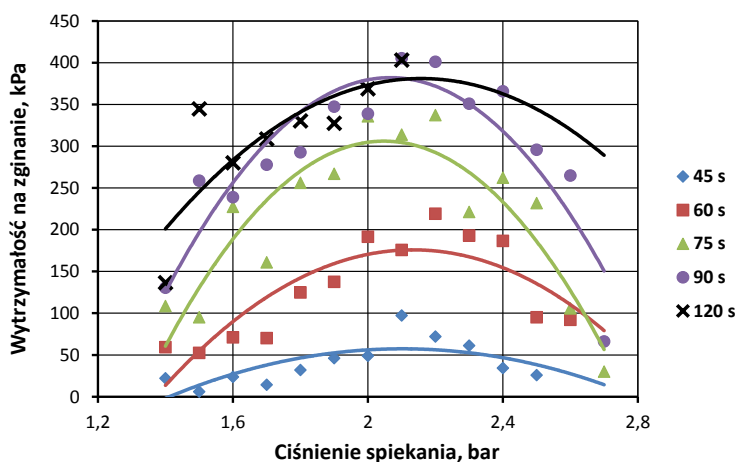
*Tabela 4.7. Zestawienie wyników wytrzymałości na zginanie w kPa dla polistyrenu D933B dla różnych czasów i ciśnień spiekania*

| <b>P, bar \ t, s</b> | <b>45</b> | <b>60</b> | <b>75</b> | <b>90</b> | <b>120</b> |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>1,4</b>           | 22,05     | 59,27     | 108,52    | 130,34    | 136,6      |
| <b>1,5</b>           | 5,96      | 52,28     | 95,08     | 258,74    | 344,76     |
| <b>1,6</b>           | 23,6      | 70,98     | 227,29    | 238,93    | 280,11     |
| <b>1,7</b>           | 14,28     | 69,93     | 160,79    | 277,64    | 308,65     |
| <b>1,8</b>           | 31,95     | 124,78    | 256,13    | 292,56    | 330,29     |
| <b>1,9</b>           | 46,11     | 137,38    | 266,82    | 347,21    | 327,36     |
| <b>2,0</b>           | 48,9      | 191,47    | 335,62    | 338,68    | 368,63     |
| <b>2,1</b>           | 97,08     | 175,68    | 313,83    | 405,34    | 403,03     |
| <b>2,2</b>           | 71,92     | 219,06    | 337,06    | 401,08    |            |
| <b>2,3</b>           | 61,06     | 192,97    | 221,1     | 350,88    |            |
| <b>2,4</b>           | 34,27     | 186,47    | 262,17    | 364,75    |            |
| <b>2,5</b>           | 25,77     | 94,99     | 231,82    | 295,74    |            |
| <b>2,6</b>           |           | 92        | 105,6     | 264,72    |            |
| <b>2,7</b>           |           |           | 30,02     | 66,09     |            |

Wpływ czasu i ciśnienia spiekania w autoklawie na wytrzymałość modelu styropianowego na zginanie przedstawiono na rysunkach 4.29 i 4.30.



Rys. 4.29. Wpływ czasu spiekania na wytrzymałość na zginanie dla różnych ciśnień spiekania.



Rys. 4.30. Wpływ ciśnienia spiekania na wytrzymałość na zginanie dla różnych czasów spiekania.

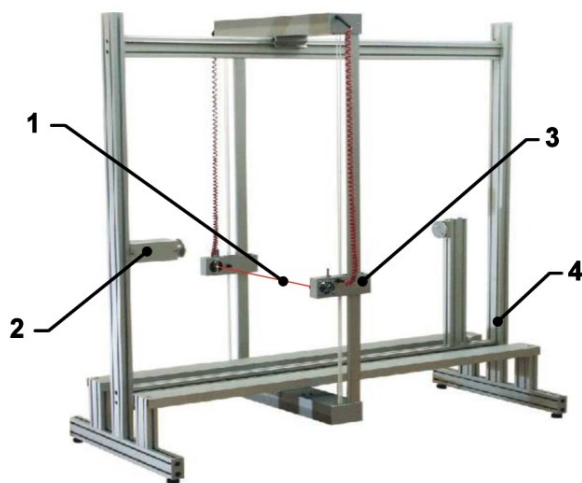
#### 4.1.5.2. Proces kształtowania modeli dla produkcji jednostkowej i małoseryjnej

Jedną z metod kształtowania modeli styropianowych dla produkcji jednostkowej i małoseryjnej jest wykonywanie ich na drodze obróbki ubytkowej. Realizowane jest to dwoma sposobami. Pierwszym sposobem jest wycinanie modeli z bloków styropianowych za pomocą rozgrzanego drutu – na ploterach termicznych.

Drugim sposobem, jest wykonanie modeli z bloków styropianowych z zastosowaniem technologii obróbki skrawaniem, za pomocą specjalnych narzędzi na obrabiarkach CNC.

#### ***4.1.5.2.1. Wykonywanie modeli na ploterach termicznych***

Ploter termiczny to urządzenie, w którym elementem tnącym jest rozgrzany drut oporowy poruszający się w dwóch osiach X i Y dzięki mikrokrokowym silnikom kontrolowanym przez komputer, służące do wycinania dowolnych kształtów z bloków lub płyt styropianowych lub innych pianek polimerowych. Przykładowy ploter termiczny, będący na wyposażeniu laboratorium w Katedrze Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji, przedstawiono na rysunku 4.31.



*Rys. 4.31. Ploter termiczny P 60 S firmy Megaplot  
1 – drut oporowy, 2 – stolik obrotowy, 3 – silnik mikrokrokowy, 4 – rama  
plotera termicznego.*

Standardowy ploter jest w stanie przemieszczać drut tnący w płaszczyźnie XY po dowolnej trajektorii, dzięki czemu możliwe jest wykonanie niemalże dowolnego kształtu pod warunkiem, że grubość modelu odpowiada grubości użytej płyty styropianowej (modele 2D).

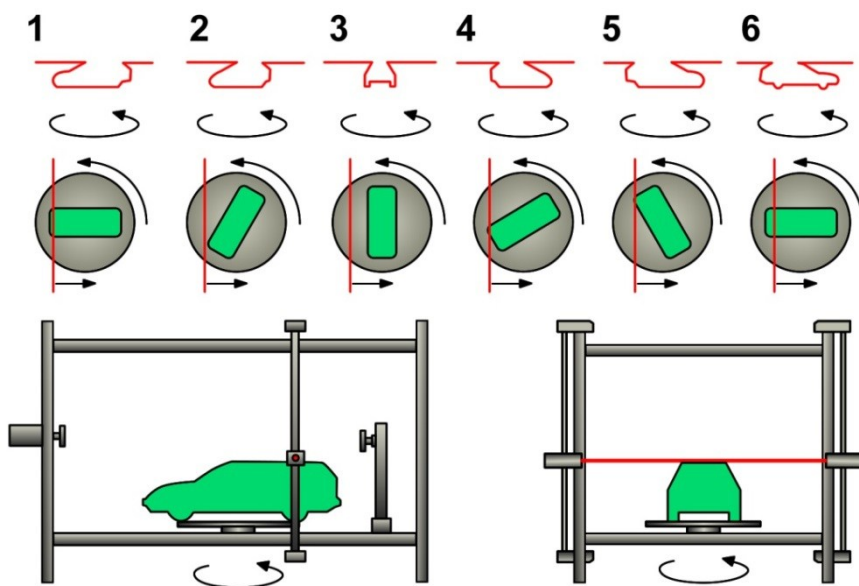
Wykonanie trójwymiarowych modeli styropianowych na ploterach termicznych umożliwia dodatkowe oprzyrządowanie w postaci stolika obrotowego czy wrzeciona. Zastosowanie stołu obrotowego lub wrzeciona pozwala na wycinanie brył obrotowych. Bardzo duże możliwości daje użycie

specjalnego narzędzia, jakim jest kształtowy drut tnący. Wycinanie modeli styropianowych na ploterze termicznym z wykorzystaniem drutu kształtowego przedstawiono na rysunku 4.32.



*Rys. 4.32. Wycinanie modeli styropianowych na ploterze termicznym za pomocą drutu kształtowego [61].*

W przypadku skomplikowanych modeli 3D można zastosować tzw. cięcie seryjne. Realizowane jest ono w kilku lub kilkunastu krokach w zależności od skomplikowania kształtu modelu i dokładności wykonania, jaką chcemy osiągnąć. Im więcej kroków, tym dokładniej wycięty zostanie model. Każdy krok cięcia seryjnego składa się z wycięcia rzutu modelu, a następnie obrotu stolika obrotowego o określony kąt. Rzut jest to kontur modelu widziany pod kolejnym z kątów. Ilość rzutów decyduje, o jaki kąt obracana będzie bryła podczas wycinania. W trakcie całego przebiegu cięcia seryjnego stolik obrotowy wykona obrót o  $360^{\circ}$ . Ten kąt jest dzielony na tyle części, ile przygotowanych zostało rzutów. Przykładowo, realizując cięcie seryjne modelu w sześciu krokach, ploter wytnie sześć rzutów modelu z obrotem co  $60^{\circ}$ . Rzuty modelu, mogą zostać przygotowane automatycznie przez oprogramowanie plotera w oparciu o model 3D wycinanego obiektu lub w programie graficznym jako osobne rysunki. Przykładowy przebieg cięcia seryjnego realizowanego w sześciu krokach przedstawiono na rysunku 4.33. Na schemacie za pomocą strzałek oznaczono kierunek obrotu stolika oraz kierunek przemieszczania się drutu oporowego podczas wycinania rzutów modelu.



*Rys. 4.33. Schemat przebiegu cięcia seryjnego na ploterze termicznym. Wycinanie brył wielopłaszczyznowych przy użyciu stołu obrotowego [62].*

Z przedstawionego powyżej schematu cięcia seryjnego wynika, że umożliwia ono wytwarzanie modeli o bardzo skomplikowanych kształtach zewnętrznych.

#### **4.1.5.2.2. Wykonywanie modeli na obrabiarkach CNC**

Duże modele styropianowe, głównie do produkcji jednostkowej i małoseryjnej, o skomplikowanych kształtach zewnętrznych, jak i wewnętrznych są wytwarzane z bloków styropianowych na maszynach CNC drogą obróbki skrawaniem. Obróbkę modeli z bloków styropianowych na obrabiarkach CNC przedstawiono na rysunku 4.34.



*Rys. 4.34. Obróbka dużych modeli styropianu na obrabiarce CNC z wykorzystaniem narzędzi skrawających.*

Kształtowanie modeli z bloków styropianowych na obrabiarkach sterowanych numerycznie odbywa się za pomocą specjalnych frezów do obróbki styropianu. Na rysunku 4.35 przedstawiono przykładowo frezy palcowe oraz kształtowe do wykonywania wnęk oraz kanałów w styropianie, zaś na rysunku 4.36 przedstawiono frezy przystosowane do obróbki płaszczyzn w blokach styropianowych.



*Rys. 4.35. Frezy palcowe oraz kształtowe do wykonywania wnęk oraz kanałów w styropianie firmy STYROTEC i Zimmermann.*



*Rys. 4.36. Frezy do obróbki płaszczyzn modeli styropianowych firmy STYROTEC i Zimmermann.*

Frezy do obróbki styropianowych bloków mogą być wykonane jako modułowe. W frezach modułowych części frezów podlegające najintensywniejszemu zużyciu podczas pracy są wymienne, co pozwala na przedłużenie czasu pracy freza. Frezy modułowe wraz z wymiennymi modułami przedstawiono na rysunku 4.37.

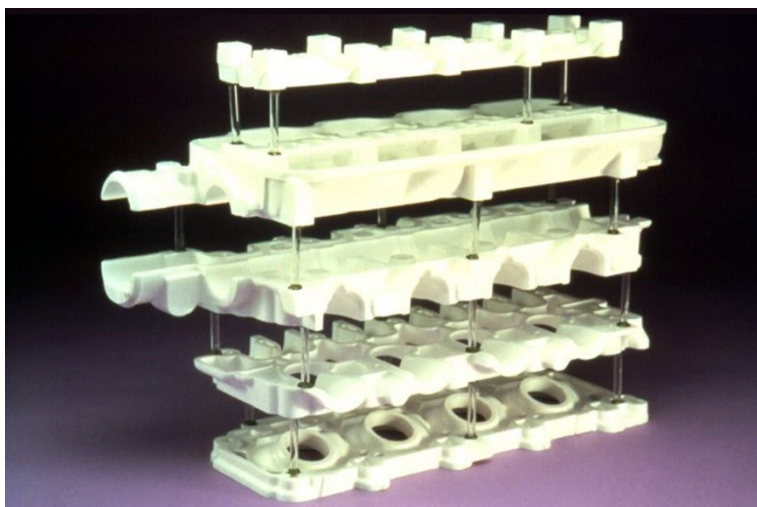


*Rys. 4.37. Frezy modułowe wraz z końcówkami do obróbki styropianu firmy STYROTEC.*

Technologia kształtowania modeli styropianowych na obrabiarkach CNC pozwala na wytwarzanie modeli o wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej. Technologia ta jest szczególnie przydatna w przypadku wykonywania dużych modeli o skomplikowanych kształtach wewnętrznych, trudnych do uzyskania innymi metodami, np. poprzez obróbkę na ploterach termicznych [63].

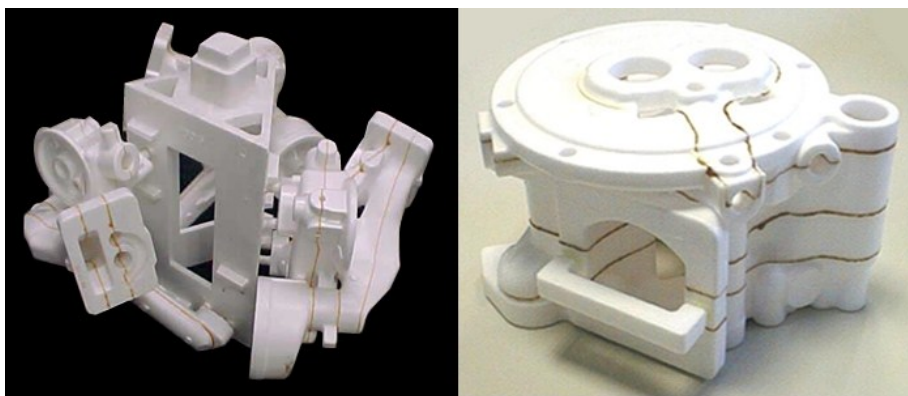
#### **4.1.5.2.3. Wykonywanie modeli łączonych z wielu części**

Modele o bardzo skomplikowanych kształtach, głównie wewnętrznych, których wykonanie jest niemożliwe przedstawionymi powyżej metodami, wykonuje się jako modele łączone z wielu części. Poszczególne części wykonuje się w matrycach, na ploterach termicznych bądź na obrabiarkach CNC, a następnie łączy w jeden model. Przykład modelu składającego się z wielu części, jeszcze przed połączeniem przedstawiono na rysunku 4.38.



*Rys. 4.38. Model wieloczęściowy przed połączeniem.*

Łączenie modeli styropianowych wykonanych z wielu części odbywa się najczęściej przy użyciu kleju. Sklejony wieloczęściowy model przedstawiono na rysunku 4.39.



*Rys. 4.39. Modele wieloczęściowe po sklejeniu.*

Do łączenia modeli styropianowych poprzez klejenie stosuje się wiele rodzajów spoiw – od klejów kauczukowych po najbardziej rozpowszechnione spoiwa topliwe-termoplastyczne. Spoiwa można nakładać ręcznie lub w sposób zmechanizowany przy użyciu robotów lub drukarek sitowo-klejowych [46].

Poza technologią klejenia stosowane są też inne sposoby łączenia, najczęściej są to połączenia mechaniczne, spawanie termiczne oraz ultradźwiękowe [64, 65, 66].

Do najpopularniejszych sposobów połączeń mechanicznych należą połączenia za pomocą kołków, zamknięć, połączenia typu wpust-wypust itp.

Spawanie termiczne jest sposobem rzadko stosowanym, ponieważ pogarsza dokładność modelu. Powierzchnie modelu, które mają być ze sobą zespawane, są uprzednio nagrzewane. Sposób łączenia modeli styropianowych za pomocą spawania jest stosowany, gdy dokładność modelu ma mniejsze znaczenie.

Technika łączenia poszczególnych części modelu w całość za pomocą ultradźwięków jest mało rozpowszechniona. Z powodzeniem tę technologię zastosowała firma Peugeot przy wytwarzaniu modeli tarczy hamulcowej wentylowanej. Model tarczy hamulcowej łączonej za pomocą ultradźwięków oraz odlew tarczy przedstawiono na rysunku 4.40.



*Rys. 4.40. Fotografia modelu styropianowego tarczy hamulcowej oraz gotowego odlewu.*

## **4.2. Przygotowanie zestawów modelowych**

Przygotowanie zestawów modelowych polega na połączeniu modelu styropianowego odwzorowującego odlew z modelami elementów układu wlewowego. Połączenie modelu z modelami elementów układu wlewowego odbywa się jedną z metod łączenia, omówionych w poprzednim rozdziale. Przykład zestawów modelowych przedstawiono na rysunku 4.41.



*Rys. 4.41. Zestawy modelowe.*

Na tak przygotowane zestawy modelowe nanosi się pokrycia ogniotrwałe, które stanowią roboczą wnękę formy. Następnie zespół modelowy suszy się w temperaturze otoczenia bądź aby przyspieszyć proces suszenia – z wykorzystaniem suszarek, nie przekraczając jednak temperatury  $70^{\circ}\text{C}$ , ponieważ wyższa temperatura mogłaby spowodować deformację modelu styropianowego.

### **4.3. Nanoszenie pokrycia ogniotrwałego na zestawy modelowe**

Pokrycia ogniotrwałe nanoszone na modele w technologii pełnej formy spełniają bardzo ważną rolę w odwzorowaniu dokładnego kształtu odlewów, ponieważ stanowią roboczą powierzchnię formy. Powierzchnia odlewu jest kształtowana przez pokrycie, które oddziela ciekły stop od materiału formy, dzięki czemu chropowatość powierzchni odlewu jest mniejsza niż w odlewach wytwarzanych w masach klasycznych. Pokrycia ogniotrwałe powinny odznaczać się:

- kompatybilnością z materiałem modelu (zdolnością do pokrywania powierzchni modelu); zapewniającą odlewowi gładką powierzchnię,
- odpowiednią lepkością, zapewniającą dobrą adhezję z powierzchnią modelu styropianowego,
- dużą szybkością wysychania,
- odpornością na ścieranie,
- wytrzymałością umożliwiającą manipulowanie zespołem modelowym,

- możliwie dużą przepuszczalnością dla gazów,
- równomierną grubością pokrycia.

Pokrycia stosowane są w celu zmniejszenia częstości występowania wnikania ciekłego stopu w osnowę formy, przypalenia piasku, erozji formy i jej zapadania się oraz zapewnienia wymaganej małej chropowatości powierzchni odlewów [67, 68].

#### **4.3.1. Rodzaje i własności pokryw ogniotrwałych**

W skład typowych pokryw ogniotrwałych stosowanych w technologii lost foam wchodzi:

- materiały ogniotrwałe – krzemiany, glino-krzemiany, tlenki aluminium, mika, mulit,
- spoiwo – bentonit, żywice winylowe,
- składniki reologiczne (rozcieńczalnik, alkohol lub woda),
- środki zwilżające,
- środki przeciwfermentacyjne oraz barwniki,
- środki tiksotropowe, które zapobiegają ściekaniu pokrycia z modelu.

Najczęściej stosowanymi pokryciami ogniotrwałymi do nanoszenia na modele styropianowe są pokrycia firmy Huetteness-Albertus oraz pokrycia firmy Ashland. Podstawowe własności wybranych pokryw firmy Huetteness-Albertus przedstawiono w tabeli 4.8.

*Tabela 4.8. Własności pokryw firmy Huetteness-Albertus*

| Nazwa pokrycia                | DISOPAST 6230/7                                                                                                                                                                                                              | DISOPAST 4805                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dane techniczne wg producenta | na bazie różnych krzemianów glinu i magnezu<br>kolor – zielono-szary<br>zawartość substancji stałej 58%<br>gęstość – 1,48 g/cm <sup>3</sup><br>lepkość – czas wypływu ok. 19 s – 4 mm kubek Forda wg DIN<br>wartość pH – 9,5 | na bazie różnych krzemianów glinu<br>kolor – czerwony<br>zawartość substancji stałej 70,5%-72,5%<br>gęstość – 1,6 g/cm <sup>3</sup><br>lepkość – czas wypływu ok. 16-18 s – 4 mm kubek Forda wg DIN<br>wartość pH – 6,8-7,8 |
| Nazwa pokrycia                | DISOPAST 6779                                                                                                                                                                                                                | DISOPAST 7559                                                                                                                                                                                                               |
| Dane techniczne wg producenta | na bazie różnych krzemianów glinu i magnezu<br>kolor – szary<br>zawartość substancji stałej 54%<br>gęstość – 1,48 g/cm <sup>3</sup><br>lepkość – czas wypływu ok. 17 s – 4 mm kubek Forda wg DIN<br>wartość pH – 9,5         | na bazie różnych krzemianów glinu<br>kolor – czerwony<br>zawartość substancji stałej ok. 70%<br>gęstość – 1,75 g/cm <sup>3</sup><br>lepkość – czas wypływu ok. 22 s – 4 mm kubek Forda wg DIN<br>wartość pH – ok. 7,5       |

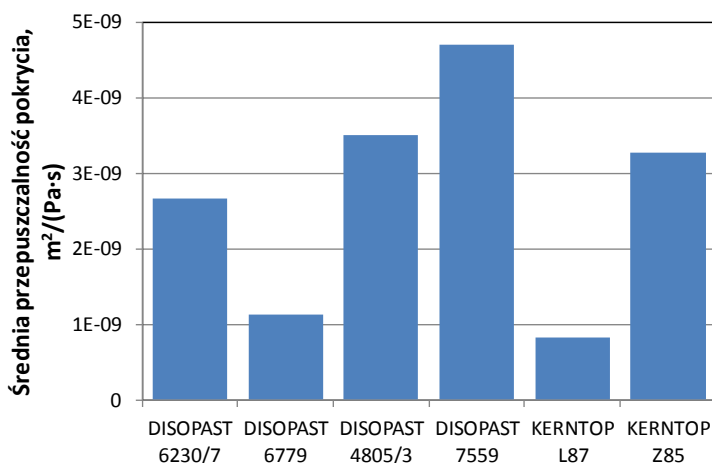
Własności pokryw firmy Ashland przedstawiono w tabeli 4.9.

*Tabela 4.9. Własności pokryw firmy Ashland*

| Nazwa pokrycia                | KERNTOP L87                                                                                                                                                                             | KERNTOP Z85                                                                                                                    |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dane techniczne wg producenta | na bazie cyrkonowo-ceramicznej z dodatkiem tlenków<br>kolor – różowy<br>zawartość substancji stałej – 83-84%<br>gęstość – 2,6 g/cm <sup>3</sup><br>lepkość – 30 Pa·s osadzanie – 0%/24h | kolor – biały<br>zawartość substancji stałej 82%<br>gęstość – 2,4 g/cm <sup>3</sup><br>lepkość – 10 Pa·s<br>osadzanie – 1%/24h |

Jednym z najistotniejszych parametrów charakteryzujących pokrycie ogniotrwale w technologii lost foam, jest przepuszczalność dla gazów powstających przy zgazowywaniu modeli styropianowych. W Katedrze Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji dla przedstawionych w tabelach 4.8 i 4.9 pokryw ogniotrwałych oznaczono przepuszczalność. Wyniki badań przepuszczalności tych pokryw przedstawiono na rysunku 4.42. Największą przepuszczalnością

charakteryzowało się pokrycie ogniotrwałe firmy Huetteness-Albertus DISO-PAST 7559, a najmniejszą pokrycie firmy Ashland KERNTOP L87.



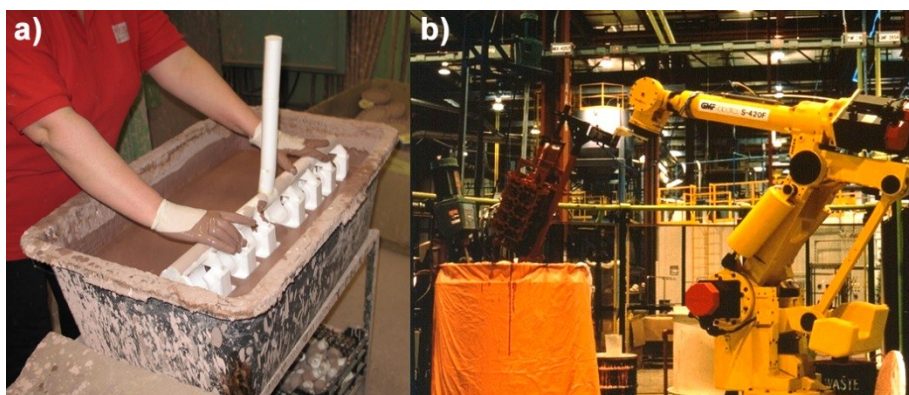
Rys. 4.42. Wyniki przepuszczalności pokryw ogniotrwałych [109].

Przepuszczalność pokryw ogniotrwałych zależy od takich parametrów, jak: wielkość ziaren, ich kształt oraz rodzaj materiału osnowy [70, 71]. Pokrycia ogniotrwałe na bazie krzemianów mają najmniejszą przepuszczalność, która zwiększa się wraz ze wzrostem wielkości ziaren [44]. Na porowatość pokryw, która ma ścisły związek z ich przepuszczalnością, ma również wpływ rodzaj użytego rozpuszczalnika. Zastosowanie wody zwiększa porowatość pokryw, a obniża ją dodanie środków dyspersyjnych [39]. Temperatura jest czynnikiem wykazującym wpływ na przepuszczalność pokryw ogniotrwałych. Wzrost temperatury z 20 do 600°C powoduje zwiększenie przepuszczalności o około 60% [45].

#### 4.3.2. Metody nanoszenia pokryw ogniotrwałych

Pokrycia ogniotrwałe mogą być nanoszone na zespoły modelowe za pomocą pędzla, natryskiwania, zanurzania-maczania. Najprostszym sposobem nanoszenia pokryw jest nanoszenie pędzlem. Sposób ten jest chętnie stosowany przy produkcji jednostkowej zarówno małych, jak i dużych odlewów, szczególnie w przypadku gdy modele mają mało sztywną budowę. Nanoszenie pokrycia ochronnego poprzez natryskiwanie jest najbardziej odpowiednie dla

modeli pozbawionych wnęk i kanałów wewnętrznych. Pokrycia ogniotrwałe stosowane do nanoszenia na modele styropianowe, są zwykle cieczami tiksotropowymi, tzn. że intensywne mieszanie pokrycia zmniejsza ich lepkość, co pozwala na ich nanoszenie poprzez zanurzanie w nich modelu. Dla modeli o skomplikowanych kanałach wewnętrznych zalecane jest nanoszenie pokrycia ogniotrwałego poprzez zanurzanie. Po naniesieniu pokrycia poprzez zanurzenie należy odczekać pewien czas, potrzebny na spłynięcie jego nadmiaru, co zapewnia otrzymanie jednakowej grubości pokrycia, a więc również jednakowej przepuszczalności. Nanoszenie pokrycia na zestawy modelowe poprzez zanurzenie przedstawiono na rysunku 4.43.

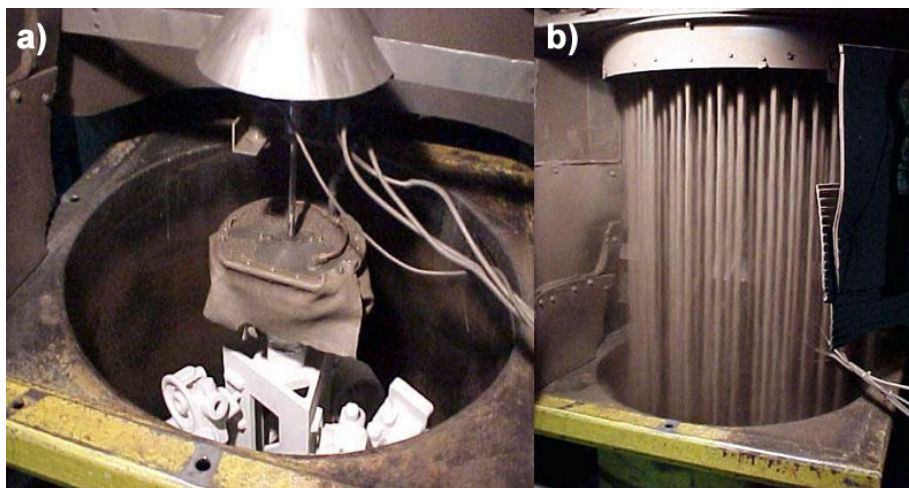


*Rys. 4.43. Nanoszenie na zestaw modelowy pokrycia ogniotrwałego metodą zanurzeniową: a) ręcznie, b) przy użyciu robota.*

Niedoskonałością tej metody jest możliwość uszkodzenia modelu podczas zanurzania. Zestawy modelowe o ażurowych kształtach podczas zanurzania mogą ulec deformacji bądź zniszczeniu, ponieważ działa na nie siła wyporu hydraulicznego.

#### **4.4. Formowanie zespołów modelowych w masach bez lepiszcza**

Zespoły modelowe z naniesionym na nie pokryciem ogniotrwałym wkładane są do skrzyń formierskich. Skrzynie są następnie zasypywane piaskiem formierskim bez lepiszcza. Formowanie zespołów modelowych jest przedstawione na rysunku 4.44.



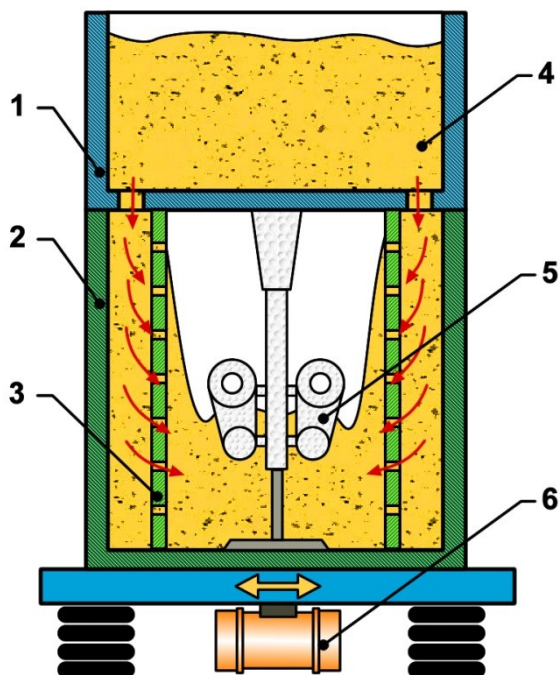
*Rys. 4.44. Formowanie modelu styropianowego w skrzyni: a) zamocowanie modelu w skrzyni, b) zasypanie piaskiem.*

Zespoły modelowe mogą być wkładane do skrzyń formierskich ręcznie lub mechanicznie. Operacja zasypywania skrzyń piaskiem lub masami formierskimi musi być wykonywana ostrożnie, aby uniknąć zniszczenia zespołu modelowego [45, 72]. Po zasypaniu skrzyni następuje operacja zagęszczania piasku. Piasek zagęszczany jest przez wprowadzenie skrzyni w wibrację, np. za pomocą silników elektrowibracyjnych. Czynność ta wymaga szczególnej staranności i kontroli. Niedostatecznie zagęszczony piasek może doprowadzić do pęknięcia pokrycia i penetracji metalu, zaś zbyt duże zagęszczenie może powodować zniekształcenia modelu, a nawet zmniejszenie przepuszczalności złoża piasku. Zniekształcenia modeli można uniknąć poprzez zasypywanie i wibrowanie sekwencyjne [52, 73]. Optymalne zagęszczenie uzyskuje się przy drganiach zapewniających przyspieszenie  $2\div 4$  g, częstotliwości  $100\div 125$  Hz i małej amplitudzie [74]. Większe zagęszczenia piasku uzyskuje się, gdy wnęki umieszczonych w skrzyni modeli usytuowane są poziomo. Piaski o szerszym rozkładzie wymiarów ziaren lepiej się zagęszczają, ale gorzej wypełniają wnęki formy [18].

#### **4.4.1. Zasypywanie zespołów modelowych**

Zasypywanie piaskiem zespołu modelowego, umieszczonego w skrzyni formierskiej może odbywać się w różny sposób. Jeden ze sposobów zasypywania

zespołu modelowego w skrzyni formierskiej piaskiem bez lepiszcza przedstawiono na rysunku 4.45.



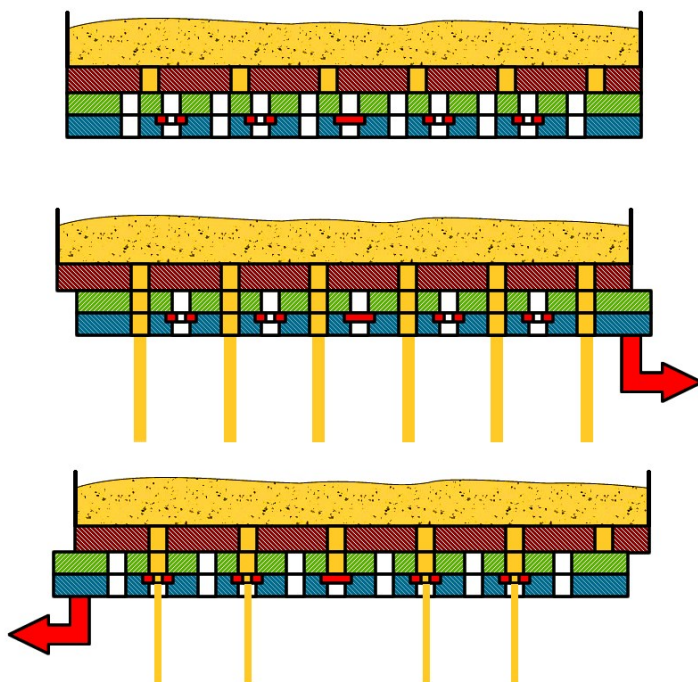
*Rys. 4.45. Schemat zasypywania skrzyni formierskiej*

*1 – zbiornik zasypowy, 2 – skrzynia formierska – zewnętrzne ścianki, 3 – skrzynia formierska – wewnętrzne ścianki, 4 – piasek formierski, 5 – zespół modelowy, 6 – elektrowibrator.*

Na skrzyni formierskiej 2, 3 umieszczono zbiornik zasypowy z piaskiem 1, w którego dnie znajdują się otwory. Skrzynia formierska posiada podwójne ścianki, w wewnętrznych 3 wykonane są otwory, przez które zasypuje się piasek. Takie rozwiązanie pozwala na zniwelowanie naporu piasku na model, który mógłby skutkować uszkodzeniem modelu. Zasypywanie piasku ze zbiornika 1 następuje grawitacyjnie lub jest wspomagane poprzez vibracje. Istnieje możliwość podczas zasypywania skrzyni piaskiem jednoczesne jego zagęszczanie za pomocą elektrowibratora 6.

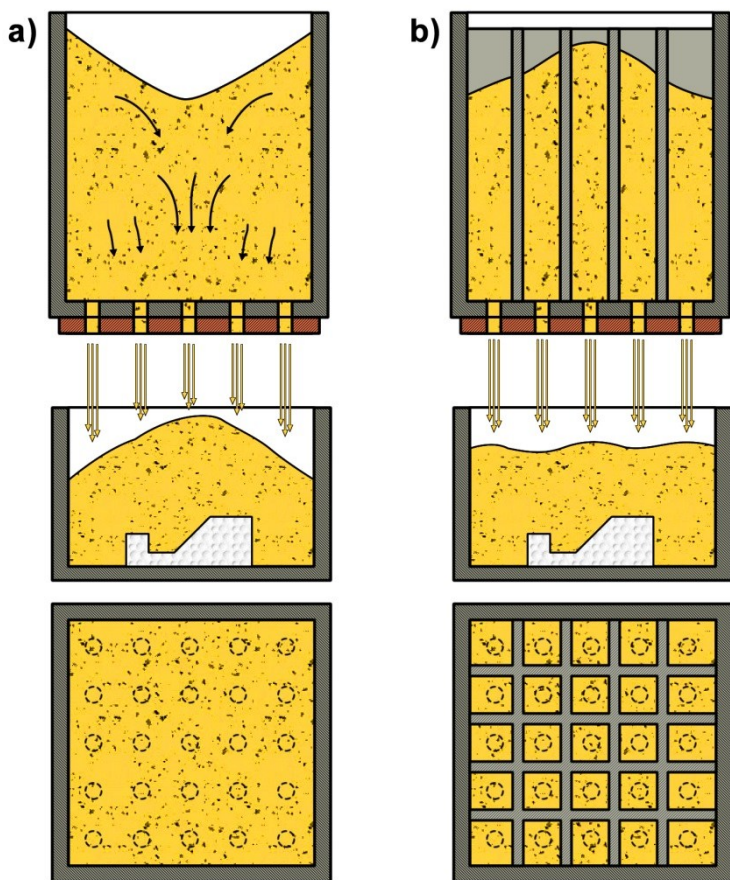
Inne rozwiązanie zasypywania-formowania zespołów modelowych proponuje firma Vulcan. Rozwiązanie proponowane przez tę firmę daje możliwość zasypywania skrzyń formierskich bez podwójnych ścianek, przy równoczesnym

zabezpieczeniu zestawu modelowego przed uszkodzeniem przez nasypywany piasek. Piasek zasypywany jest przez otwory w dnie zbiornika. Pomiędzy zbiornikiem a skrzynią formierską umieszczono zespół płyt z otworami o różnej średnicy. Takie rozwiązanie pozwala na regulowanie prędkości zasypywania skrzyni formierskiej suchym piaskiem. Wzajemne położenie płyt sterowane jest serwomechanizmem. Schemat regulacji prędkości zasypywania przedstawiono na rysunku 4.46.



Rys. 4.46. Schemat regulacji prędkości zasypywania w skrzyni zasypowej Rain Gate firmy Vulcan.

Równomierne zasypanie skrzyni formierskiej piaskiem można osiągnąć, stosując skrzynie formierskie z przegrodami. Schemat przebiegu zasypywania skrzyni formierskiej bez przegród oraz z przegrodami przedstawiono na rysunku 4.47.



Rys. 4.47. Schemat przebiegu zapewniania skrzyni formierskiej suchym paskiem:  
a) skrzynia zasypowa bez przegród, b) skrzynia zasypowa z przegradami.

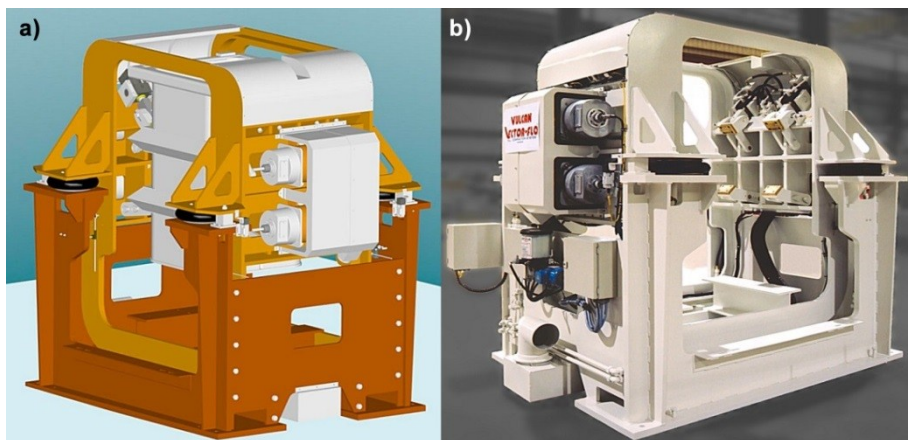
#### 4.4.1.1. Piaski formierskie

W procesie lost foam stosowane są piaski formierskie bez lepiszcza. Powinny one spełniać szczególne wymagania co do grubości ziaren oraz ich kształtu. Wymiary ziaren piasku używanego w procesie dobiera się tak, aby zapewniały przede wszystkim odpowiednią przepuszczalność, odpowiednie wypełnienie zewnętrznych i wewnętrznych wnęk modeli oraz zagęszczenie form. Grubsze frakcje mają większą przepuszczalność, lecz są trudniej zagęszczalne [75]. Piaski o okrągłych ziarnach charakteryzują się większą płynnością, a więc łatwiej wypełniają wnęki modeli o skomplikowanych kształtach. Drobniejsze piaski łatwiej wypełniają wąskie przejścia i szczeliny i można je szybciej schłodzić, szczególnie w formach, w których przy formowaniu zespołów

modelowych wykorzystuje się zjawisko fluidyzacji. Najczęściej do formowania używa się piasków kwarcowych ze względu na ich powszechność występowania oraz niską cenę, jednakże korzystne jest nieraz zastosowanie piasków cyrkonowych. Piaski cyrkonowe lepiej się zagęszczają i posiadają większą przewodność cieplną, a więc zapewniają intensywniejszy odbiór ciepła od odlewu, stąd szybsze krzepnięcie i stygnięcie odlewu, co przyczynia się do podwyższenia jego własności wytrzymałościowych.

#### 4.4.2. Zagęszczanie piasków formierskich

Zagęszczanie piasków formierskich w procesie lost foam odbywa się na specjalnych stanowiskach. Stanowiska do seryjnej produkcji odlewów w technologii lost foam mają zwykle postać modułową, składają się z skrzyń formierskich, w których formuje się i zalewa modele styropianowe, oraz części stanowiska przeznaczonej do zagęszczenia. Rozwiązanie stanowiska do zagęszczania firmy Vulkan przedstawiono na rysunku 4.48.

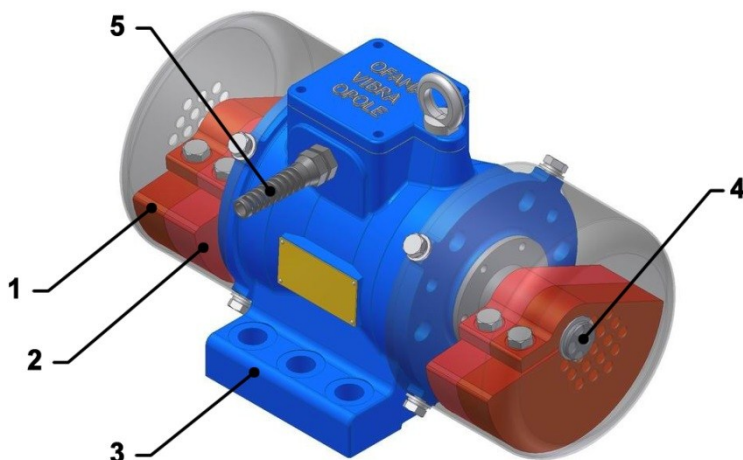


*Rys. 4.48. System VECTOR-FLO firmy Vulcan, stosowany w procesie zagęszczania piasku formierskiego w technologii lost foam:  
a) schemat, b) widok rzeczywisty.*

Stanowisko firmy Vulcan składa się z ramy górnej i dolnej połączonych za pomocą elastomerowych podkładek. Dolna część stanowiska jest nieruchoma, zaś górna część ramy, w której umieszcza się skrzynię formierską, posiada zamocowane symetrycznie na bokach cztery silniki elektrowibracyjne wymuszające odpowiedni

charakter drgań, zapewniający pożądane zagęszczenie piasku w skrzyni formierskiej bądź jego rozluźnienie.

Silnik elektrowibracyjny (elektrowibrator) jest trójfazowym silnikiem indukcyjnym z wirnikiem klatkowym. Elektrowibrator firmy Ofama przedstawiono na rysunku 4.49.



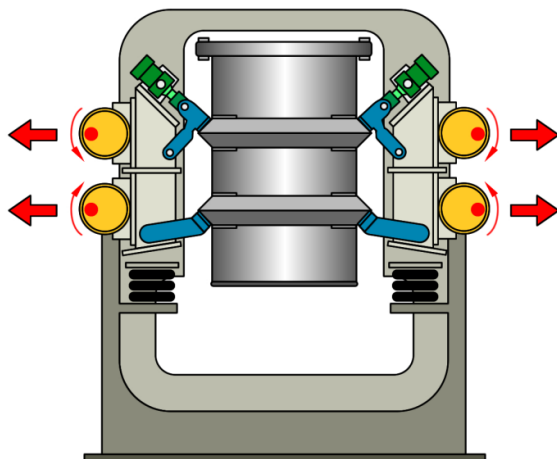
*Rys. 4.49. Elektrowibrator firmy Ofama*

*1 – niewyważona masa nastawna, 2 – niewyważona masa stała, 3 – stojan, 4 – wał silnika, 5 – przylącze elektryczne.*

Na obu końcach wału 4 o wzmocnionym łożyskowaniu są osadzone niewyważone masy: stałe 2 i nastawne 1. Moment statyczny tych mas, a tym samym wielkość siły wymuszającej drgania, może być regulowany bezstopniowo poprzez zmianę wzajemnego położenia mas nastawnych względem stałych. Zastosowanie przemiennika częstotliwości (tzw. falownika) w znacznym zakresie umożliwia płynną regulację obrotów silnika, a przez to siły wymuszającej. Oprócz zmiany siły wymuszającej zmianie ulega częstotliwość drgań, co często ma zasadnicze znaczenie dla zamierzonych efektów [76].

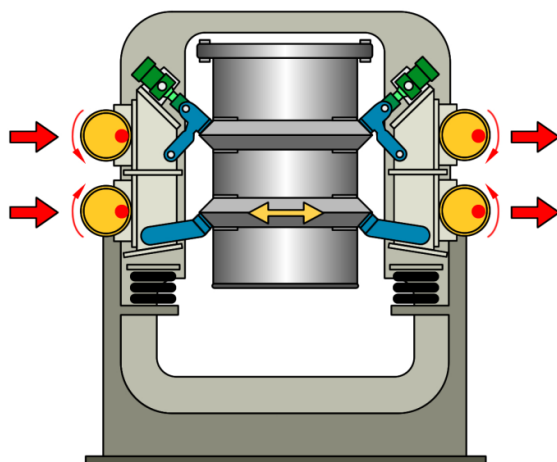
Sprzężenie elektrowibratorów umożliwia ich synchronizację, a przez to sterowanie nimi w taki sposób, aby można było uzyskiwać drgania w pożądanych dla procesu zagęszczania kierunkach. Zmiany kierunku wirowania, amplitudy oraz częstotliwości drgań silników elektrowibracyjnych można dokonywać „on the fly” – podczas pracy. Na rysunkach 4.50, 4.51, 4.52 przedstawiono możliwości sterowania silnikami elektrowibracyjnymi w celu uzyskania określonej orientacji drgań.

Przeciwbieżne zsynchronizowanie wszystkich czterech silników elektrowibracyjnych powoduje wzajemne wygaszenie wygenerowanych przez nich drgań, co przedstawiono na rysunku 4.50.



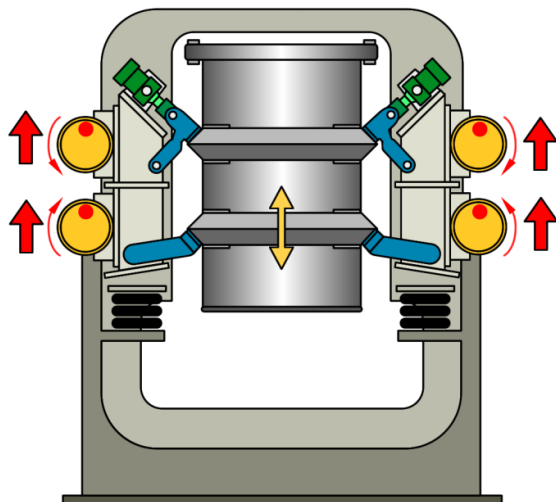
*Rys. 4.50. Schemat rozkładu drgań przy rozbieżnym zsynchronizowaniu wszystkich czterech silników elektrowibracyjnych – wzajemne wygaszenie drgań.*

Synchronizacja niewyważonych mas w elektrowibratorach zbieżnych w płaszczyźnie poziomej daje wypadkową drgań czysto w płaszczyźnie poziomej (rys. 4.51).



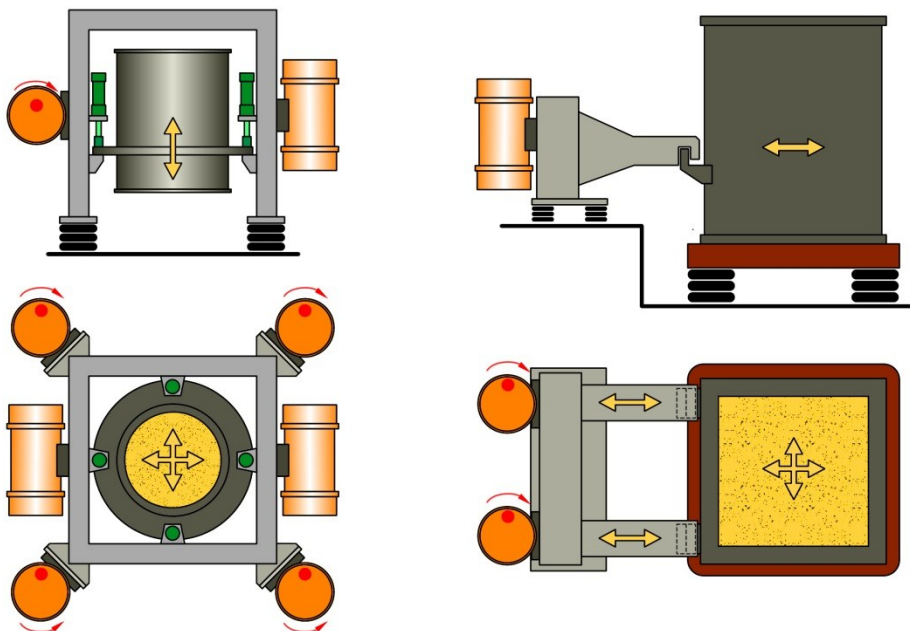
*Rys. 4.51. Schemat rozkładu drgań przy zbieżnym zsynchronizowaniu wszystkich czterech silników w płaszczyźnie poziomej – drgania w płaszczyźnie poziomej.*

Synchronizacja niewyważonych mas w elektrowibratorach zbieżnych w płaszczyźnie pionowej daje wypadkową drgań czysto w płaszczyźnie pionowej, co przedstawiono na rysunku 4. 52.



*Rys. 4.52. Schemat rozkładu drgań przy zbieżnym zsynchronizowaniu wszystkich czterech silników w płaszczyźnie pionowej – drgania w płaszczyźnie pionowej.*

Inne przykłady rozwiązań stanowisk do zagęszczania przedstawiono na rysunku 4.53. W każdym z nich podobnie jak w rozwiązaniu firmy Vulcan stanowisko oparte jest na sprężystych, elastycznych podporach umożliwiających niewielkie przemieszczenia, zaś różne rozmieszczenie oraz odpowiednie sprzężenie silników elektrowibracyjnych daje możliwość wymuszenia pożądanego kierunku drgań stanowiska z zamontowaną na nim skrzynią formierską, celem zagęszczenia bądź rozluźnienia piasku.



Rys. 4.53. Schemat przykładowych rozwiązań stanowisk do zagęszczania piasku w procesie lost foam.

## 4.5. Formowanie w masach chemoutwardzalnych

Do wytwarzania odlewów wielkogabarytowych o masie dochodzącej do 50 ton w technologii lost foam stosuje się najczęściej masy furanowe. W skład tradycyjnej masy formierskiej wchodzi [77]:

- piasek kwarcowy stanowiący podstawę,

oraz:

- żywice furanowe mocznikowo-furfurylowe, fenolowo-furfurylowe, mocznikowe, (w niektórych przypadkach alkidowe, epoksydowe, melaminowe) – od 0,8 do 1,2 części masy,
- katalizatory – od 0,3 do 0,6 części masy

będące spoiwem masy.

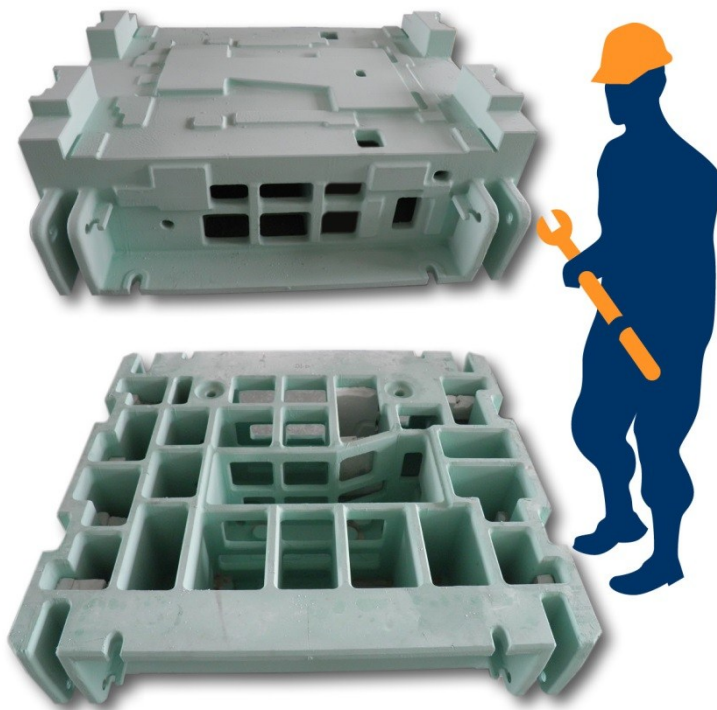
Zaletami stosowania mas furanowych w technologii lost foam jest:

- dobra przepuszczalność gazów i par powstałych w czasie oraz po procesie zalewania,
- zdolność zachowania pełnej przydatności do wielokrotnego użycia w formie domieszek do nowych mas,
- wyeliminowanie temperatury jako czynnika utwardzającego.

Modele styropianowe, których przykłady przedstawione są na rysunkach 4.54 i 4.55, wytwarzane są metodą obróbki skrawaniem na obrabiarkach CNC.

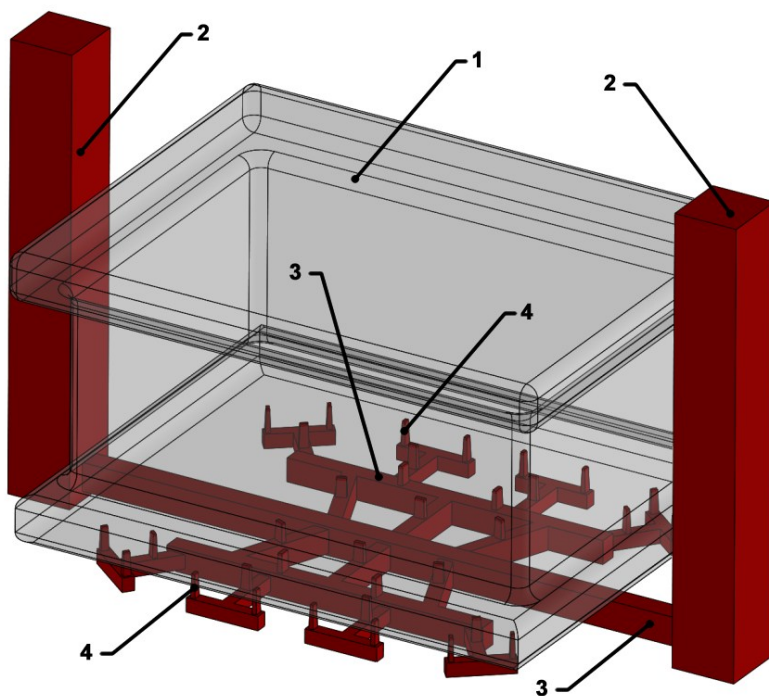


*Rys. 4.54. Model styropianowy wielkogabarytowy.*



*Rys. 4.55. Model styropianowy (widok z dołu i góry) z naniesionym pokryciem ogniotrwałym.*

Układ wlewowy dla największych odlewów może posiadać nawet cztery wlewy główne, zalewane jednocześnie przez nadstawne zbiorniki wlewowe wykonane z masy furanowej. Na rysunku 4.56 przedstawiono budowę układu wlewowego z dwoma wlewami głównymi. Wlewy rozprowadzające tworzą „pajęczynę” kanałów pod modelem, na których równomiernie rozmieszczone są wlewy doprowadzające.



*Rys. 4.56. Schemat układu wlewowego dla odlewu wielkogabarytowego  
 1 – model, 2 – wlewy główne, 3 – wlewy rozprowadzające, 4 – wlewy doprowadzające.*

## **5. FORMY DO WYTWARZANIA MODELI DLA PROCESU LOST FOAM**

### **5.1. Formy do kształtowania modeli na automatach**

Proces formowania modeli styropianowych stosowanych w metodzie lost foam odbywa się za pomocą specjalnie skonstruowanych form. Forma składa się z dwóch części: formy lewej (stempla) i prawej (matrycy), do której są podłączone niezbędne wymagane technologią media, tzn.: para wodna, woda, powietrze, podciśnienie. Obie części formy są instalowane na maszynie (automacie) do wytwarzania modeli polistyrenowych za pomocą specjalnych ram parowych. Zadaniem ram parowych jest takie zamocowanie formy, aby była odpowiednia przestrzeń dla komór parowych, do których doprowadzana jest para wodna. Do komór parowych doprowadzony jest również układ próżniowy oraz układ powietrzny. Zadaniem układu próżniowego jest wytworzenie podciśnienia we wnętrzu formy, które wspomaga wypełnianie wnęki formy w trakcie wdmuchiwanie granulatu z wstępnie spienionego polistyrenu. Zadaniem układu powietrznego jest wytwarzanie nadciśnienia we wnętrzu wnęki formy, które powoduje obluźowywanie ukształtowanego modelu styropianowego w gnieździe formy podczas usuwania modelu. We wnętrzu komór parowych znajdują się również elementy układu chłodzenia.

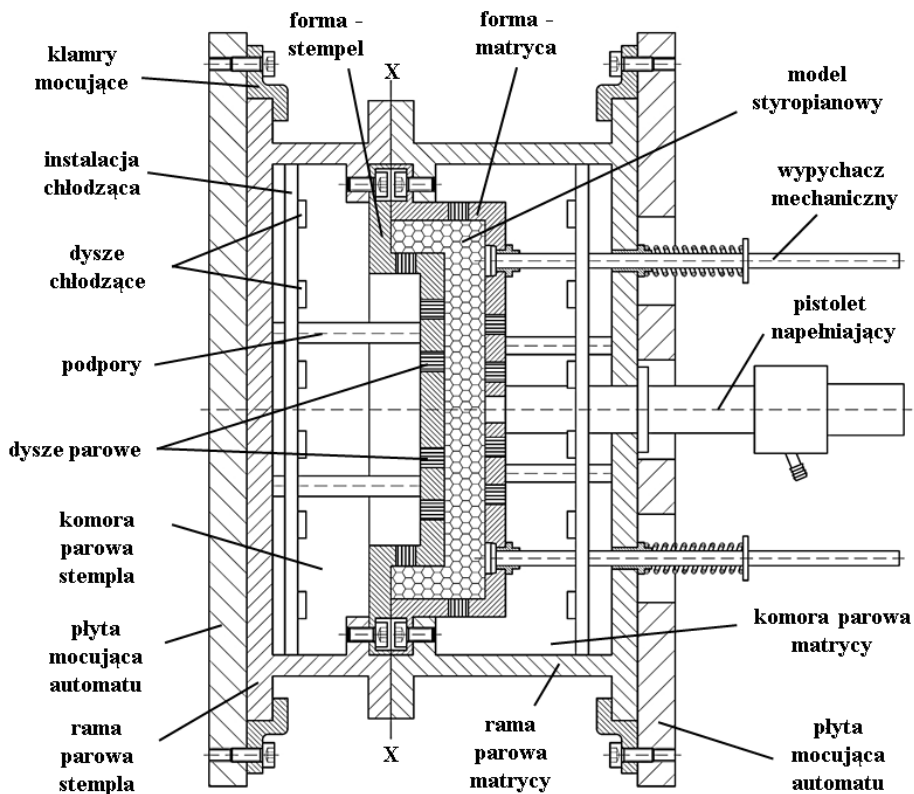
Jedna część formy mocowana jest na automacie w części nieruchomej, zaś druga w części ruchomej. Zazwyczaj po stronie części nieruchomej znajdują się wtryskiwacze – pistolety napełniające służące do wypełnienia wnęki formy granulami wstępnie spienionego polistyrenu. Drugą połowę formy montuje się w części ruchomej automatu pozwalającej na otwarcie formy i usunięciu modelu. Do usuwania ukształtowanych modeli polistyrenowych z wnęki formy stosuje się układ wypychania modelu. Wypychanie modelu zazwyczaj jest realizowane za pomocą wypychaczy mechanicznych. W przypadku modeli o cienkich ściankach stosuje się równocześnie z wypychaniem mechanicznym wypychanie pneumatyczne. Do komór parowych podawane jest, jak już wspomniano, sprężone powietrze, które poprzez korki odpowietrzające wytwarza we wnęce chwilowe nadciśnienie. W wyniku powstałego nadciśnienia model polistyrenowy zostaje obluźowany w formie, a następnie usuwany jest za pomocą wypychaczy mechanicznych. W przypadku modeli o dużych wymiarach gabarytowych do wyjmowania modeli

styropianowych dodatkowo stosuje się manipulatory, które za pomocą przyssawek podciśnieniowych wyjmują model z formy.

Formy jako narzędzia do kształtowania modeli styropianowych wykonuje się zazwyczaj ze stopów aluminium. Technologia ich wykonywania może być bardzo różna, w zależności od stopnia skomplikowania kształtu formy. Zazwyczaj stemple i matryce wykonuje się jako odlewane lub poprzez obróbkę skrawaniem z półfabrykatów w postaci płyt, bloków itp.

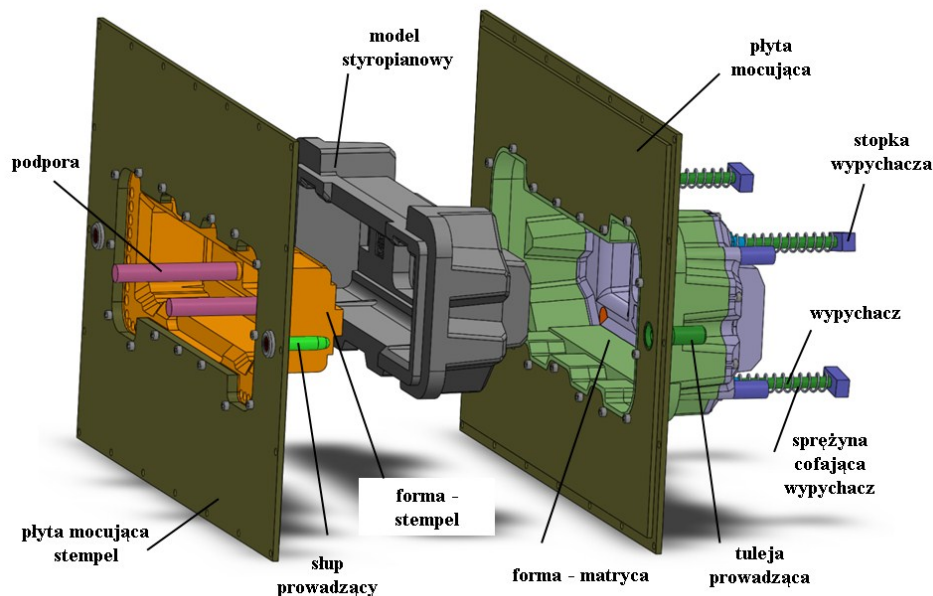
Konstrukcja i budowa form wykonywanych poprzez obróbkę ubytkową z punktu widzenia użytkowania jest znacznie praktyczniejsza od odlewanych, ponieważ formy tak wykonane są łatwiejsze w naprawach. Rozwiązanie takie pozwala na szybką naprawę polegającą na wymianie wyłącznie uszkodzonego elementu bez konieczności odtwarzania całej formy.

Schemat formy do wytwarzania modeli styropianowych w automacie wraz z komorami parowymi i niezbędnymi instalacjami przedstawiono na rysunku 5.1.



*Rys. 5.1. Schemat formy do wykonywania modeli styropianowych w automacie wraz niezbędnymi instalacjami.*

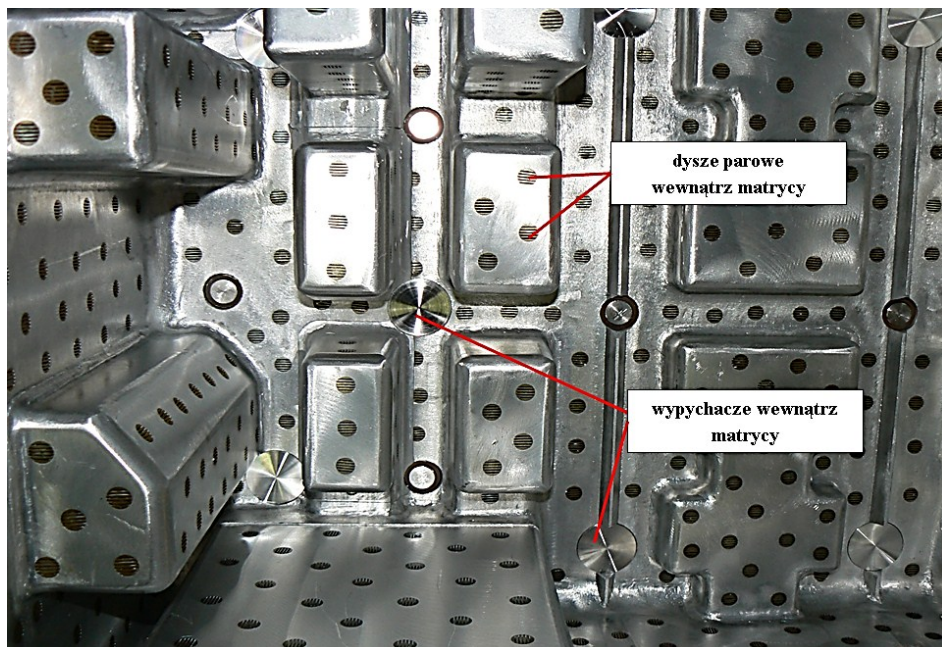
Wnęka formy do kształtowania modelu ze styropianu jest odwzorowana przez matrycę i stempel. Matryca odwzorowuje powierzchnię zewnętrzną modelu, zaś stempel kształtuje powierzchnię wewnętrzną modelu. Budowę stempla i matrycy schematycznie przedstawiono na rysunku 5.2.



*Rys. 5.2. Forma do kształtowania modeli styropianowych.*

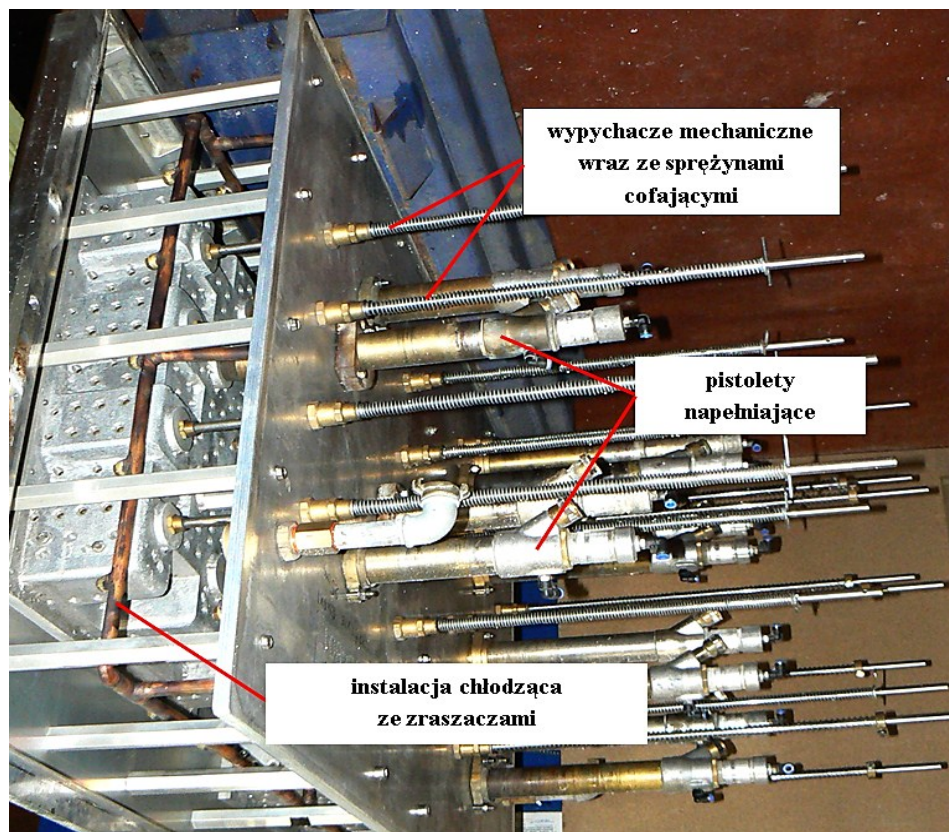
W celu wykonania modelu styropianowego wstępnie spienione granulki wdmuchiwane są do wnętrza formy. Następnie do wnętrza formy wypełnionej wstępnie spienionym granulem polistyrenu doprowadzana jest poprzez komory parowe para wodna o temperaturze około  $115^{\circ}\text{C}$ . Para wodna dostarcza niezbędnej ilości ciepła potrzebnego do powtórnego ekspandowania granulek i ich spiekania w model styropianowy. Parę wodną z komory parowej do wnętrza formy doprowadza się za pomocą dysz parowych, które przedstawiono na rysunku 5.1 oraz na rysunku 5.3 przedstawiającym fotografię rzeczywistej formy.

Po zakończeniu kształtowania modelu formę należy schłodzić, a tym samym schłodzić model styropianowy, będący jeszcze w gnieździe formy. Schłodzenie formy ma na celu zakończenie procesu ekspandowania granulatu i pozwala na usunięcie wytworzonego modelu styropianowego. Do chłodzenia stempli i matryc służy instalacja wodna wraz z dyszami zraszającymi, zamocowana w komorach parowych. Gdy temperatura matrycy i stempla obniży się do temperatury około  $50^{\circ}\text{C}$ , następuje otwarcie formy i usunięcie z niej modelu styropianowego za pomocą wypychaczy.



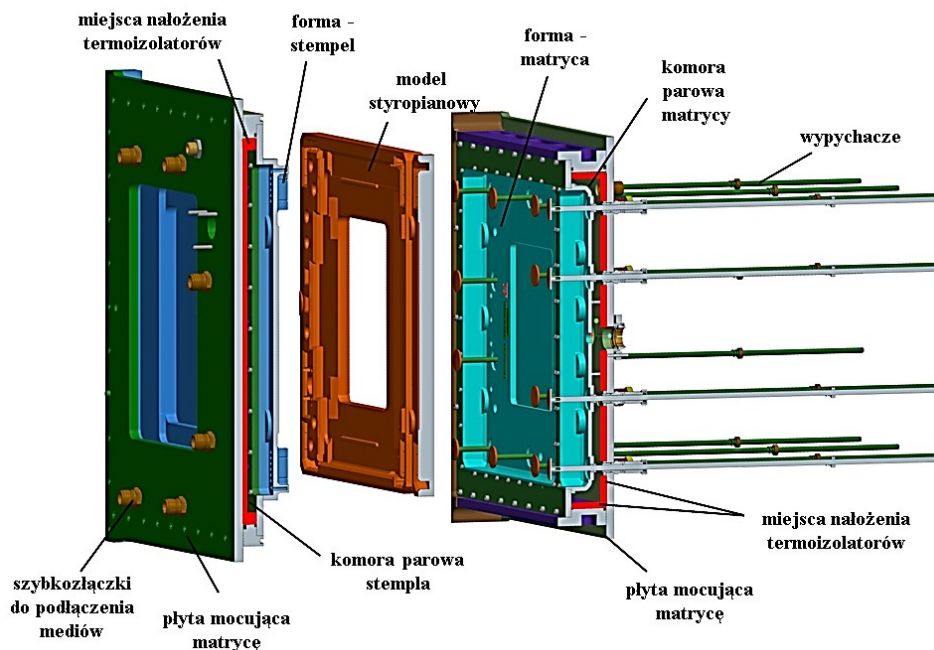
*Rys. 5.3. Widok wnętrza formy – matrycy z dyszami parowymi oraz wypychaczami.*

Wycofanie wypychaczy mechanicznych trzpieniowych jest najczęściej realizowane za pomocą sprężyn. Instalację chłodzenia formy wodą oraz układ usuwania modelu styropianowego przedstawiono na rysunkach 5.1 oraz rysunku 5.4.



*Rys. 5.4. Fotografia matrycy z układem chłodzenia wraz systemem wypychaczy.*

Zaprezentowane powyżej formy do wytwarzania modeli styropianowych zużywają znaczne ilości energii, głównie cieplnej. W praktyce szuka się coraz częściej rozwiązań, które będą charakteryzowały się mniejszym zużyciem energii. Przykładem nowoczesnych i oszczędnych form są ekoformy charakteryzujące się mniejszym zużyciem energii, dzięki zmniejszeniu objętości komór parowych oraz zastosowaniu lepszej izolacji cieplnej. Stosowanie ekoform pozwala na oszczędności mediów nawet do 60%. Dla małych form stosuje się powłoki izolacyjne nanoszone, a w przypadku dużych form stosuje się wkładki izolacyjne w komorach parowych lub stosuje komory parowe z tworzyw o małym współczynniku przewodzenia. Przykład ekoformy z natryskiwaną powłoką izolacyjną przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Ekoforma do kształtowania modeli styropianowych.

## 5.2. Elementy standardowe

Formy do otrzymywania modeli styropianowych są formami, gdzie stosowanych jest wiele elementów standardowych, które w łatwy sposób można zaadaptować do ich wytwarzania. Do elementów standardowych przede wszystkim należą: wtryskiwacze – pistolety napełniające, wypychacze, dysze parowe.

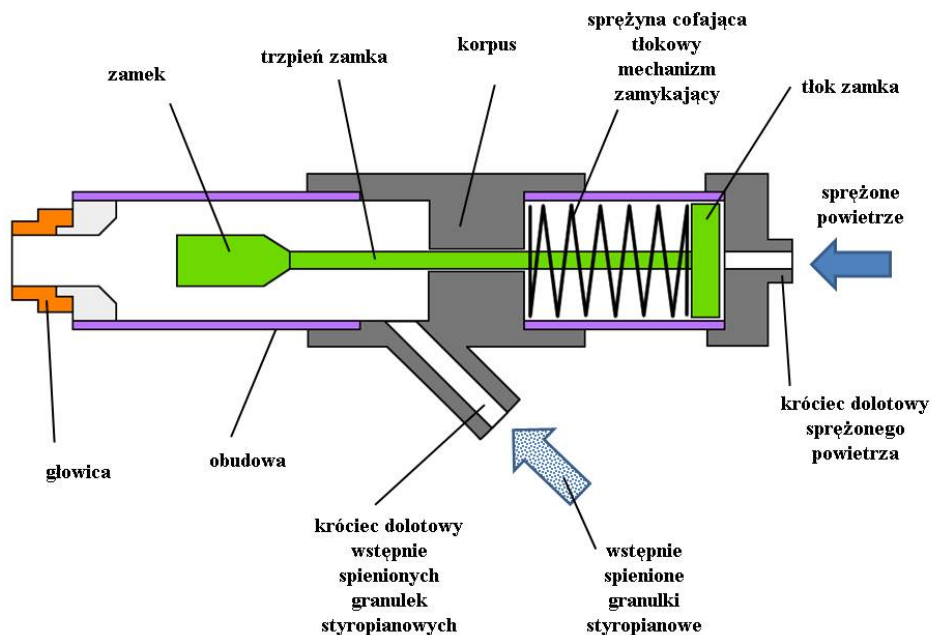
### 5.2.1. Pistolety napełniające

Pistolety napełniające mają za zadanie doprowadzanie i wdmuchnięcie do wnętrza formy wstępnie spienionych granulek wstępnie spienionego polistyrenu. Pistolety napełniające ze względu na ich budowę można podzielić na:

- pistolety napełniające pneumatyczno-sprężynowe,
- pistolety pneumatyczne,

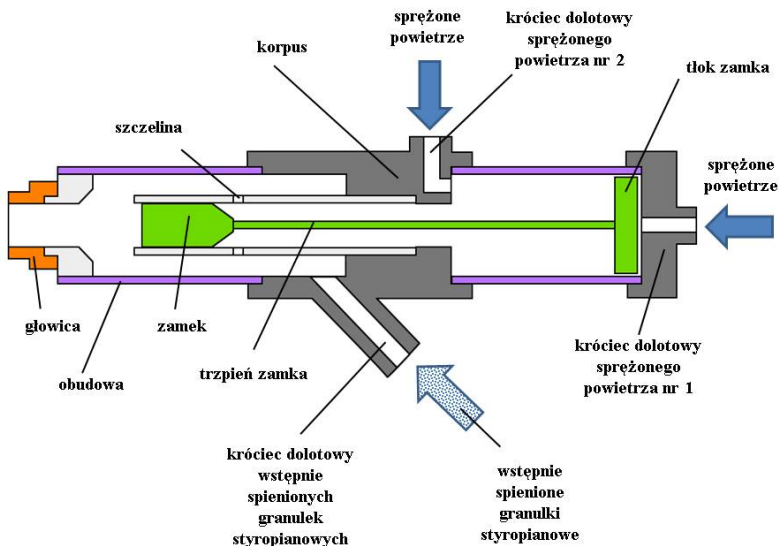
- pistolety pneumatyczne wraz z wypychaczem.

Pistolety napełniające pneumatyczno-sprężynowe są pistoletami najczęściej stosowanymi do wdmuchiwania wstępnie spienionego granulatu polistyrenowego do wnęki formy. Charakteryzują się prostą budową i nie wymagają złożonej instalacji pneumatycznej do swojej pracy. Budowę pistoletów tego typu przedstawiono na rysunku 5.6. Wstępnie spieniony granulát jest dostarczany do pistoletu w strumieniu sprężonego powietrza przez króciec dolotowy, który następnie poprzez głowicę wprowadzany jest do wnęki formy. Po zakończeniu napełniania wnęki formy tłok zamka przemieszcza pod wpływem sprężonego powietrza, zamykając otwór w głowicy. Podczas następnego cyklu napełniania sprężyna wycofuje zamek, otwierając gniazdo głowicy do ponownego wdmuchnięcia granulatu.



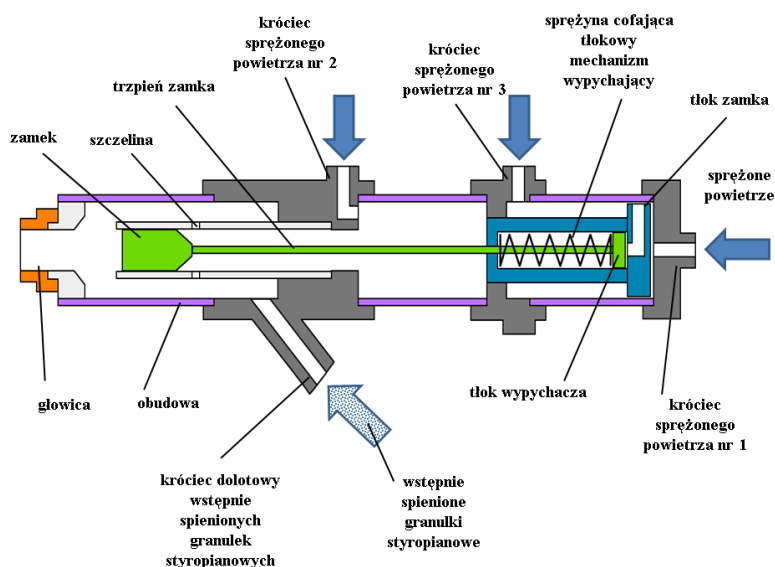
Rys. 5.6. Schemat pistoletu napełniającego pneumatyczno-sprężynowego.

W pistolecie pneumatycznym, którego schemat przedstawiono na rysunku 5.7, przemieszczanie tłoka zamka jest realizowane przez sprężone powietrze, które doprowadzane jest do króćca nr 2 podczas napełniania, zaś po zakończonym procesie napełniania do króćca nr 1.



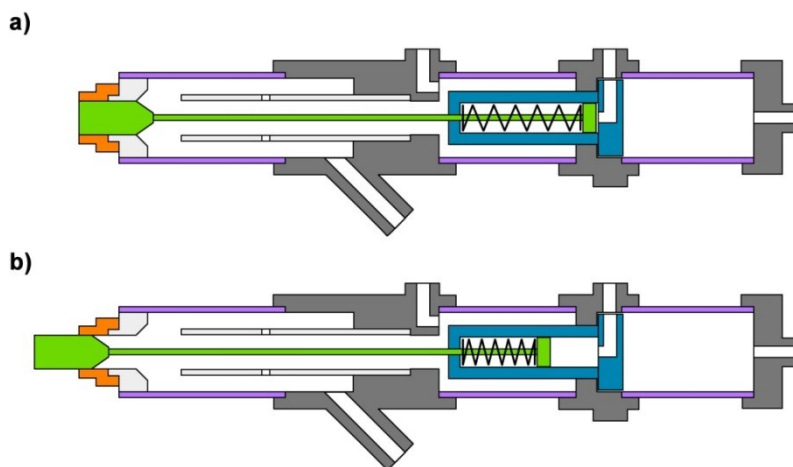
Rys. 5.7. Schemat pneumatycznego pistoletu napełniającego.

Na rysunku 5.8 przedstawiono schemat pistoletu napełniającego wraz z wypychaczem pneumatyczno-mechanicznym.



Rys. 5.8. Schemat pneumatycznego pistoletu napełniającego z wypychaczem pneumatyczno-mechanicznym.

Po zakończeniu procesu spiekania modelu styropianowego do króćca nr 3 doprowadzane jest sprężone powietrze, które przemieszcza tłok wypychacza, a więc i zamek, powodując wypchnięcie modelu z gniazda formy. Schemat działania pistoletu napełniającego z wypychaczem przedstawiono na rysunku 5.9 a) i 5.9 b).



*Rys. 5.9. Schemat pneumatycznego pistoletu napełniającego z wypychaczem pneumatyczno-mechanicznym: a) układ zamkniętego doprowadzania granulatu, b) układ pracy pistoletu napełniającego w trybie wypychacza.*

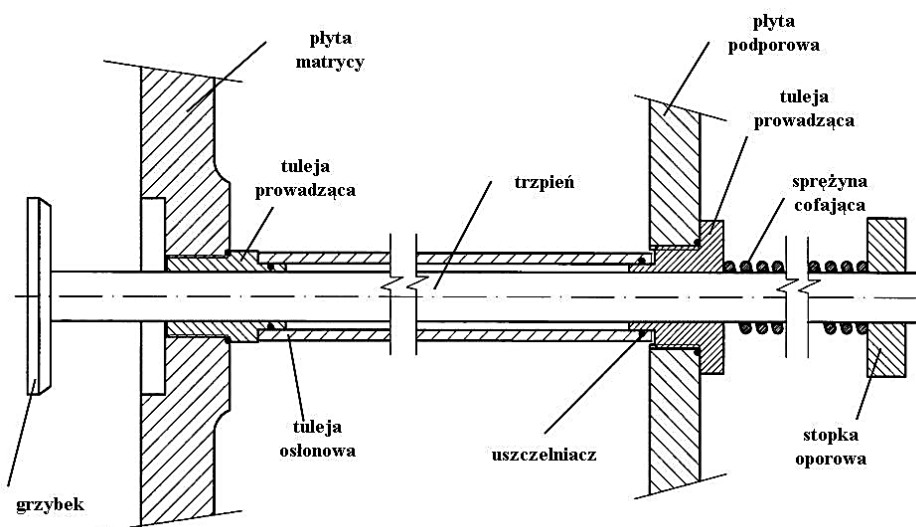
## 5.2.2. Wypychacze

Do najczęściej spotykanych układów usuwania modeli z gniazda formy należą:

- mechaniczny układ wypychania,
- pneumatyczny układ wypychania,
- kombinowany układ wypychania.

Mechaniczny układ wypychania modelu jest realizowany w oparciu o wypychacze trzpieniowe. Wypychacze te w części formy są zakończone grzybkami służącymi do wyrzucania modelu z gniazda formy. Grzybki zamocowane są na trzpieniu, który prowadzony jest w tulejach prowadzących. Na końcu wypychaczy zamontowane są stopki oporowe. Pełnią one funkcję zderzaków. Pomiędzy formą a stopką oporową znajduje się sprężyna, której

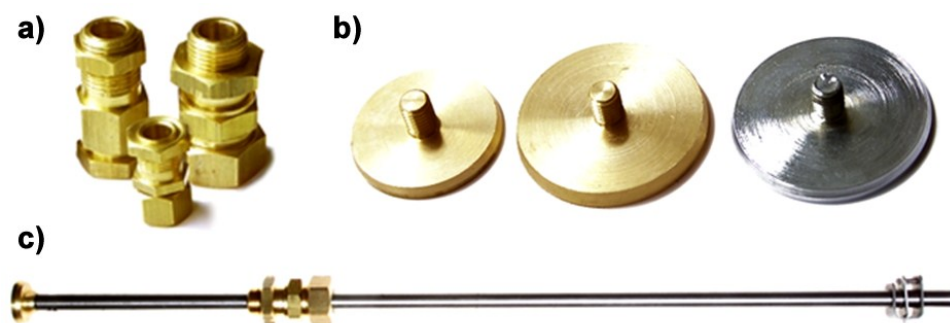
zadaniem jest wycofanie wypychacza po zakończeniu wypychania. Schemat budowy wypychacza mechanicznego przedstawiono na rysunku 5.10.



Rys. 5.10. Schemat budowy wypychacza trzpieniowego.

Wypychacze trzpieniowe są najczęściej spotykanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i są szczególnie przydatne do wypychania modeli o stosunkowo niewielkich rozmiarach.

Elementy zespołu wypychaczy mechanicznych przedstawiono na rysunku 5.11 [78].



Rys. 5.11. Wypychacz mechaniczny: a) tuleje prowadzące; b) grzybki; c) kompletny wypychacz.

Trzpienie wypychaczy są wykonywane ze stali nierdzewnej, występują w różnych długościach od 100 do 1400 mm. Do trzpieni za pomocą połączenia gwintowego mocowane są grzybki, wykonane zazwyczaj z brązu lub stali nierdzewnej, o średnicach zewnętrznych od 16 do 50 mm [78].

Dla modeli o dużych wymiarach gabarytowych i skomplikowanym kształcie stosuje się pneumatyczny układ wypychania lub kombinowany. Do komór parowych doprowadzane jest sprężone powietrze, które poprzez dysze parowe oddziałuje na model powodując jego poluzowanie. Następnie za pomocą wypychaczy mechanicznych lub za pomocą manipulatorów model zostaje usunięty z gniazda formy.

### **5.2.3. Dysze parowe**

Dysze parowe spełniają kilka funkcji w trakcie tworzenia modelu ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych. W czasie napełniania wnęki formy wstępnie spienionymi granulkami polistyrenu spełniają rolę odpowietrzników. W procesie spiekania-kształtowania modelu służą do doprowadzenia pary wodnej z komory parowej do wnętrza formy. Po zakończeniu procesu kształtowania modelu polistyrenowego dysze parowe, jak już wspomniano, mogą wspomagać pracę wypychaczy, doprowadzając do gniazda formy powietrze.

Najczęściej stosowanymi dyszami parowymi są dysze walcowe z otworami, kształt których przedstawiono na rysunku 5.12 [78]. Powierzchnia dysz parowych na ściankach bocznych jest radełkowana, co pozwala na trwałe zamocowanie ich poprzez wcisk w gnieździe formy.



*Rys. 5.12. Dysze parowe walcowe z otworami.*

Innym rodzajem powszechnie stosowanych dysz parowych są dysze szczelinowe. Para wodna jest doprowadzana do wnętrza formy za pomocą specjalnie naciętych szczelin. Przykłady walcowych dysz szczelinowych przedstawiono na rysunku 5.13 [78].



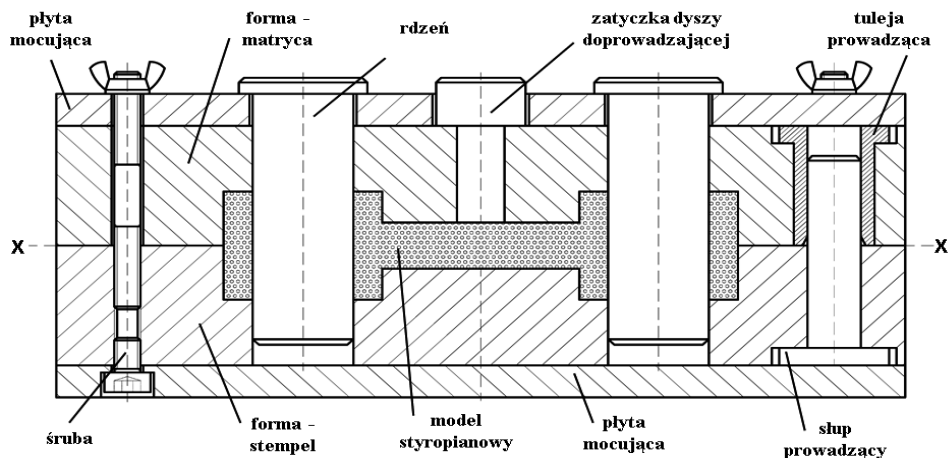
*Rys. 5.13. Dysze parowe walcowe ze szczelinami.*

Dysze parowe są zazwyczaj produkowane ze stopów aluminium lub brązu o średnicach od 2 do 30 mm. Średnice otworków w dyszach walcowych z otworami zawierają się przedziale od 0,3÷1 mm, zaś szerokość szczelin w dyszach walcowych ze szczelinami zawiera się w przedziale od 0,2÷0,8 mm.

### 5.3. Formy do kształtowania modeli w autoklawach

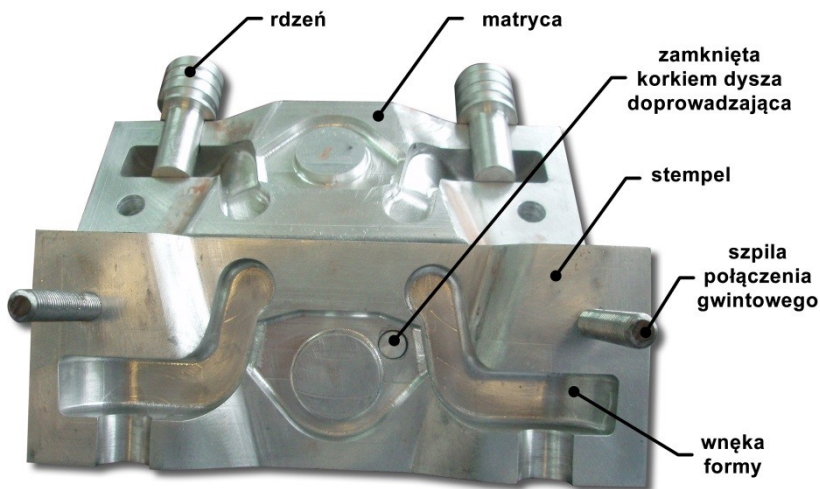
Prostszą metodą wytwarzania modeli styropianowych jest ich kształtowanie w formach wygrzewanych w autoklawach. Forma składa się z matrycy, stempla, rdzeni, słupów prowadzących, elementów złącznych. Po złożeniu formy i jej skróceniu, wnękę formy wypełnia się wstępnie spienionym granulatem, poprzez dyszę doprowadzającą za pomocą pistoletu napełniającego. Po zakończeniu procesu napełniania formy dyszę zamyka się korkiem. Formę wypełnioną granulatem umieszcza się w autoklawie. Do autoklawu doprowadza się parę wodną o temperaturze około  $115^{\circ}\text{C}$ . Po wytrzymaniu formy w autoklawie określony czas, wyjmuje się ją z autoklawu, chłodzi w wodzie, a następnie wyjmuje model.

Uproszczoną konstrukcję formy współpracującej z autoklawem przedstawiono na rysunku 5.14.



Rys. 5.14. Schemat konstrukcji formy do autoklawu.

Poniżej przedstawiono formy produkcyjne do kształtowania modeli styropianowych w autoklawach, stosowane w odlewni Ozimek firmy Chofum. Na rysunku 5.15 przedstawiono formę do wytwarzania modeli styropianowych ramienia kątowego.



*Rys. 5.15. Widok formy do wytwarzania modeli ramienia kąowego.  
Odlew z żeliwa EN-GJS-400-15.*

Na rysunku 5.16 przedstawiono formę produkcyjną wraz z modelem *wspornika*.  
Odlew *wspornika* z żeliwa EN-GJS-400-15.



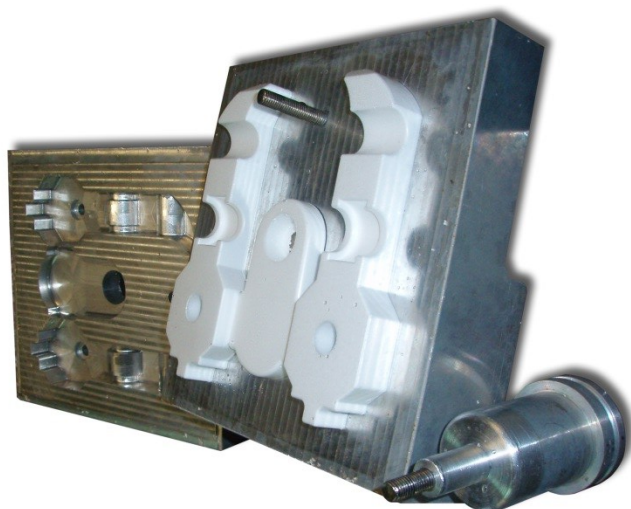
*Rys. 5.16. Forma produkcyjna do wytwarzania styropianowego modelu  
wspornika. Odlew z żeliwa EN-GJS-400-15.*

Przykład formy produkcyjnej do wytwarzania modelu *podpory*, dla  
odlewu z żeliwa EN-GJS-400-15 przedstawiono na rysunku 5.17.



*Rys. 5.17. Forma produkcyjna do wytwarzania styropianowego modelu podpory.  
Odlew z żeliwa EN-GJS-400-15.*

Na rysunku 5.18 przedstawiono formę produkcyjną wraz z modelami styropianowymi zgrzebla prawego i lewego. Odlew wykonuje się ze staliwa 340-550W.



*Rys. 5.18. Forma produkcyjna do wytwarzania styropianowego modelu zgrzebla  
prawego i lewego. Odlew ze staliwa niestopowego 340-550W.*

## LITERATURA

- [1] **Clegg A.J.:** (1986). Expanded-polystyrene Moulding – a Status Report. *Foundry Trade Journal International*. June, 51-69.
- [2] **Shroyer H.F.:** (1958). US Patent No. 2, 830, 343.
- [3] **Smith T.R.:** (1964). US Patent No. 3, 157, 924.
- [4] **Jankowski W. & Żółkiewicz Z.:** (1997). Główne czynniki technologiczne w procesie pełnej formy. *Przegląd Odlewnictwa*. 1/97, Kraków.
- [5] **Anon.** (1986). Lost foam casting shaping up to the future. A review of the polystyrene moulding technology from Foseco. *The British Foundryman*. 79(10), 466.
- [6] **Kanicki D.P.:** (1989). Producing Foam Patterns with Ventelss Molds. *Modern Casting*. September, 36-37.
- [7] **Lessiter M.J.:** (1996). Innovations in controlling the Lost Foam. *Modern Casting*, 86.
- [8] **Kannan P., Biernacki J.J. & Visco Jr. D.P.:** (2007). A review of physical and kinetic models of thermal degradation of expanded polystyrene foam and their application to the lost foam casting process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 78, 162-171.
- [9] **Pacyniak T.:** (2007). Effect of foamed pattern density on the Lost Foam process. *Archives of Foundry Engineering*. 7(3), 231-236.
- [10] **Sands M. & Shivkumar S.:** (2003). EPS molecular weight and foam density effects in the lost foam process. *Journal of Materials Science*. 38, 2233-2239.
- [11] **Барбакадзе А., Хонф В. & Баер Ю.:** (2001). Пористость алюминиевых отливок при литье сверху по газифицируемым моделям. *Литейное Производство*, 7.
- [12] **Stiepanow U.A.:** (1976). Litie po gazificirujemym modelam. Moskwa, Maszynostrojenie.
- [13] **Barone M.R.:** (2005). A foam ablation model for Lost Foam casting of aluminium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 48, 4132-4149.
- [14] **Caulk D.A.:** (2006). A foam ablation model for Lost Foam casting of aluminium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 49, 2124-2136.
- [15] **Pacyniak T.:** (1998). Podstawy teoretyczne procesu pełnej formy. Prace Komisji Naukowej. PAN, Katowice. 23, 46-47.
- [16] **Pacyniak T.:** (1999). Analiza procesu zapełniania wnętrza ciekłym stopem w metodzie pełnej formy. *Krzepnięcie Metali i Stopów*. 1(40), 177.

- [17] **Yao X. & Shivkumar S.:** (1999). Mould filling characteristics in lost foam casting process. *Materials Science and Technology*. 13, 841-846.
- [18] **Pacyniak T.:** (2006). Teoretyczne i technologiczne podstawy procesu wytwarzania odlewów metodą pełnej formy. Politechnika Łódzka. Zeszyty Naukowe Nr 985. Rozprawy Naukowe Z. 350, Łódź.
- [19] **Kaczorowski R.:** (2008). Wpływ wybranych czynników technologicznych na proces wytwarzania odlewów żeliwnych metodą pełnej formy. Rozprawa doktorska, Łódź.
- [20] **Liu Y., Bakhtiyarov S.I. & Overfelt R.A.:** (2002). Numerical modeling and experimental verification of mold and evolved gas pressure in lost foam casting process. *Journal of Materials Science*. 37, 2997-3003.
- [21] **Barone M.R. & Caulk D.A.:** (2005). A foam ablation model for lost foam casting of aluminum. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 48, 4132-4149.
- [22] **Mirbagheri S.M.H., Serajzadeh S., Varahram N. & Davami P.:** (2006). Modelling of foam degradation in lost foam casting process. *Materials and Design*. 27, 115-124.
- [23] **Yang J., Huang T. & Fu J.:** (1998). Measuring of gas pressure in EPC process. *AFS Trans*. 128, 21.
- [24] **Hopf W., Bast J., Lippek P. & Kuhlitz C.:** (2000). Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen, Teil 2. Vergleich theoretischer und experimenteller Daten. *Giessereiforschung*. 52(2), 61-71.
- [25] **Hopf W., Bast J. & Radoev B.:** (1999). Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen, Teil 1. Mathematisches Model: Wärme- und Massebilanz. *Giessereiforschung*. 51(4), 145-153.
- [26] **Hopf W., Bast J. & Radoev B.:** (2000). Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen, Teil 1. Mathematisches Model: Impulsbilanz. *Giessereiforschung*. 52(1), 11-17.
- [27] **Hopf W. & Bast J.:** (2000). Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen, Teil 3. Instationäre Formfüllung. *Giessereiforschung*. 52(3), 100-111.
- [28] **Hopf W. & Bast J.:** (2000). Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen, Teil 4. Gesteuerte Formfüllung. *Giessereiforschung*. 52(4), 144-147.
- [29] **Rossacci J. & Shivkumar S.:** (2003). Influence of EPS bead fusion on pattern degradation and casting formation in the lost foam process. *Journal of Materials Science*. 38, 2321-2330.
- [30] **Sands M. & Shivkumar S.:** (2006). EPS bead fusion effects on fold defect formation in lost foam casting of aluminum alloys. *Journal of Materials Science*. 41, 2373-2379.
- [31] **Sands M. & Shivkumar S.:** (2003). EPS molecular weight and foam density effects in the lost foam process. *Journal of Materials Science*. 38, 2233-2239.

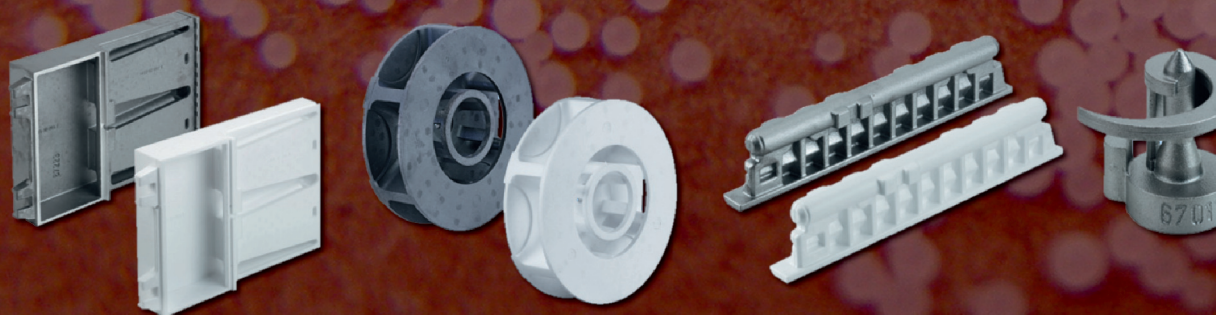
- [32] **Sands M. & Shivkumar S.:** (2003). Influence of coating thickness and sand fineness on mold filling in the lost foam casting process. *Journal of Materials Science*. 38, 667-673.
- [33] **Shivkumar S., Yao X. & Makhlof M.:** (1995). Polymer – melt interactions during casting formation in the lost foam process. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 33(1), 39-46.
- [34] **Yao X. & Shivkumar S.:** (1997). Mould filling characteristics in lost foam casting process. *Materials Science and Technology*. 13, 841-846.
- [35] **Rossacci J. & Shivkumar S.:** (2003). Bead fusion in polystyrene foams. *Journal of Materials Science*. 38, 201-206.
- [36] **Patz M. & Piwonka T.S.:** (1988). *Metals Handbook. Vol. 15. Casting*.
- [37] **Kanicki D.P. & Donovan B.:** (1989). Modern Casting. 79(9), 38.
- [38] **Niemann E.H.:** (1988). Trans A.F.S. 96, 793.
- [39] **Biederman S. & Thesis M.S.:** (1994). Worcester Polytechnic Institute. Worcester, MA.
- [40] **Gressel M.O., O'Brien D.M. & Tenaglia R.D.:** (1987). Trans AFS. 95, 503-514.
- [41] **Shivkumar S.:** (1994). *Materials Science and Technology*.
- [42] **Moll N.G. & Johnson D.R.:** (1987). European Patent Nr. 257.814.
- [43] **Moll N.G. & Johnson D.R.:** (1988). European Patent Nr. 317.042.
- [44] **Moll N.G. & Johnson D.R.:** (1987). Proceedings of The American Foundryman's Society Conference. *Evaporative Foam Casting*. 77(1), 21.
- [45] **Moll N.G. & Johnson D.R.:** (1986). *The British Foundryman*. 79(10), 454.
- [46] **Clegg A.J.:** (1991). Evaporative Pattern Casting – a Review of Recent Developments and Progress. *Foundry Trade Journal International*. June.
- [47] **Pacyniak T.:** (1994). Materiały na modele ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych. *Materiały Pomocnicze w Odlewnictwie i Metalurgii*. 28-34.
- [48] **Pacyniak T.:** (1997). Wpływ wybranych parametrów odlewania staliwa metodą pełnej formy. *Krzepnięcie Metali i Stopów*. 31.
- [49] **Moll D. & Johnson D.R.:** (1987). Proceedings of the International Conference on Advanced Casting Technology: Metals Park, OH, ASM International, 175-187
- [50] **Tarantola B. & Andre D.:** (2002). Reduction du carbone genere par le polystyrene expanse dans le procede Lost-Foam. *Fonderie Fond.d'Aujourd*. 211, 10-12.
- [51] **David P. & Kanicki, Donowan B.:** (1989). Foam Produces Aim for Improved Materials Control and Developments. *Modern Castings*. September.
- [52] **Bailey F.V. & Woodward L.A.:** (1989). UK Patent Nr. 2.218.021.
- [53] **Тарасевич Н.И., Шинский О.И., Пашенко В.Н. & Яковишин О.А.:** (1999). Оценка параметров предварительного вспенивания гранул пенополистирола. *Процессы литья*. 3.

- [54] **Rodgers R.C.:** (1985). *Foundry Management and Technology*. 113(5), 24.
- [55] **Brown J.R.:** (1988). Proceedings of The American Foundrymen's Society Conference: Evaporative Foam Casting Technology III, 159.
- [56] **Cernak K.:** (1989). New techniques for making accurate foam patterns. *Modern Casting*. 34-35.
- [57] **Harsley R.:** (1989). The Function of Tooling in Evaporative Pattern Molding. September, 32-33.
- [58] **Krzyżanowski E. & Bissinger F.:** Verfahren zur Herstellung von aus expandierten Schaumstoffperlen bestehenden verlorenen Gießmodellen für das Vollformgießverfahren, vorzugsweise zur Fertigung von Seriengussteilen, sowie Vorrichtung hierzu, patent RFN nr 3347616.
- [59] **Matz B. & Kearney D.:** Method of dimensionally stabilizing polystyrene patterns and the like, patent USA nr 926754.
- [60] **McCombe C.:** (1987). *Foundry Trade Journal International*. 10(35), 106.
- [61] <http://www.dobreplotery.pl/cc70,i,64.html>
- [62] Katalog firmy Megaplot
- [63] **Pacyniak T. & Just P.:** (2010). Wykonywanie modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych z wykorzystaniem plotera termicznego P 60 S firmy Megaplot. *Polska Metalurgia w latach 2006-2010*, Kraków.
- [64] **Anon.** (1990). *Foundry Trade Journal Internationale*. 13(2), 34.
- [65] **Huskonen W.D.:** (1987). *Foundry Management and Technology*. 115(2), 34.
- [66] **Winston J.H.:** Multipart lost foam pattern and method of making same, patent USA nr 681960.
- [67] **Rodgers R.C.:** (1989). *Foundry Management and Technology*.
- [68] **Wilkins P.S.:** (1987). UK Patent nr 2.183.517.
- [69] **Pacyniak T.:** Grant badawczy zrealizowany w Katedrze Tech. Mat i Sys. Produkcji PŁ nr N N508 443536 „Opracowanie technologicznych i teoretycznych podstaw procesu wytwarzania odlewów metodą lost foam” (niepublikowany).
- [70] **Chakherloua T.N., Mahdinia Y.V. & Akbari A.:** (2011). Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process. *Materials and Design*. 32, 162-169.
- [71] **Li J., Chen R. & Ke W.:** (2011). Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. 21, 761-766.
- [72] **Rodgers R.C.:** (1988). *Foundry Management and Technology*. 116(4), 30.
- [73] **Yoshida Y.:** (1989). UK Patent nr 2.209.277.
- [74] **Rodgers R.C. & Heine H.J.:** (1990). *Foundry Management and Technology*. 118(5), 38.
- [75] **McMellon B.A.:** (1988). A.F.S. Trans. 96, 27.

- [76] <http://ofama.pl>
- [77] **Dańko J., Dańko R. & Łucarz M.:** (2007). Procesy i urządzenia do regeneracji osnowy zużytych mas formierskich. Wydawnictwo Naukowe Akapit. 291.
- [78] <http://www.peter-kroener.de>







ISBN 978-83-7283-555-0