POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY
KATEDRA ODLEWNICTWA

ROZPRAWA DOKTORSKA

SYMULACJA KOMPUTEROWA PROCESU WYPEŁNIANIA WNĘKI FORMY W METODZIE LOST FOAM Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU ZGAZOWANIA MODELU I EWAKUACJI GAZÓW

MICHAŁ JURECZKO

PROMOTOR:

DR HAB. INŻ. DARIUSZ BARTOCHA PROF. PŚ

OPIEKUN PRZEMYSŁOWY:

DR INŻ. RAFAŁ DOJKA

GLIWICE 2023

Niniejsza Praca powstała w ramach projektu Doktorat Wdrożeniowy

finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Edukacji

Nr RJO15/SDW/001-22

oraz

dzięki środkom finansowym

i infrastrukturze Odlewni Rafamet Sp. z o. o.

SPIS TREŚCI

WSTĘP....5
1. RYS HISTORYCZNY METODY PEŁNEJ FORMY....7
2. PRZEGLĄD LITERATUROWY....8
2.1. METODA PEŁNEJ FORMY....8
2.1.1. RODZAJE METODY PEŁNEJ FORMY....12
2.1.2. MATERIAŁY STOSOWANE NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE....14
2.1.3. POLISTYREN EKSPANDOWANY....16
2.1.4. WADY ODLEWÓW W PROCESIE PENEJ FORMY....17
2.1.5. PARAMETRY TECHNOLOGICZNE W PROCESIE PEŁNEJ FORMY....19
2.2. SYMULACJE PROCESU PEŁNEJ FORMY....23
3. PIROLIZA MODELU POLISTYRENOWEGO....27
4. TEZY I CELE PRACY....31
4.1. TEZY PRACY....32
4.2. CELE PRACY....33
5. MATERIAŁY....35
5.1 JEDNORAZOWE MATERIAŁY NA MODELE ODLEWNICZE....35
5.2. MATERIAŁY FORMIERSKIE....36
6. METODYKA BADAWCZA....39
6.1. STANOWISKO DO ZGAZOWANIE MATERIAŁÓW NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE....39
6.2. BADANIA PRZEPUSZCZALNOŚCI MASY FORMIERSKIEJ....47
6.3. BADANIA SYMULACYJNE PRZEPUSZCZALNOŚCI MASY FORMIERSKIEJ....50
6.4. PRÓBA LEJNOŚCI RUFFA....54
6.4.1. BADANIA SYMULACYJNE....54
6.4.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE....57
7. WYNIKI....63
7.1. WYNIKI BADAŃ MATERIAŁÓW NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE. WYNIKI BADAŃ TESTOWYCH.....63
7.2.WYNIKI BADAŃ MATERIAŁÓW NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE. WYNIKI BADAŃ ZASADNICZYCH....66
7.3. BADANIA LABORATORYJNE PRZEPUSZCZALNOŚCI MASY FORMIERSKIEJ....74
7.4. KOMPUTEROWA SYMULACJA PRZEPUSZCZALNOŚCI....75

7.5. PRÓBA LEJNOŚCI RUFFA. BADANIA SYMULACYJNE 80
7.6. PRÓBA LEJNOŚĆI RUFFA. BADANIA EKSPERYMENTALNE 84
7.7. WPŁYW ZALEŻNOŚCI POLA POWIERZCHNI DO OBJĘTOŚCI MODELU NA PROCES WYPEŁNIANIA FORMY 92
8. SYMULACJE PRZEMYSŁOWE 100
9. ANALIZA WYNIKÓW I SPOSTRZEŻENIA 107
10. WNIOSKI 114
SPIS TABEL 115
SPIS RYSUNKÓW 116
LITERATURA 122
STRESZCZENIE 131
SUMMARY 131

WSTĘP

„Rozwój nauki zawsze zawiera w sobie element pewnego ryzyka mentalnego. Owszem, bywa to bolesne dla umysłu ludzkiego, który lepiej czuje się w łatwym i bezpiecznym świecie znanych stereotypów, ale na tym przecież polega rozwój umysłowy, nasz rozwój intelektualny jako gatunku, że każde nowe odkrycie rozbija dawne wyobrażenia”[1].

Technologia pełnej formy stanowi proces, z którego wypływa wiele korzyści w odniesieniu do tradycyjnej metody wytwarzania odlewów za pomocą modeli trwałych [2-6]. Proces ten zdecydowanie wpisuje się w technologie near net shape (NNS) [7, 8], które ograniczają koszty obróbki. Dzięki temu zużycie energii może zostać zredukowane o 25 – 35%, a koszty produkcyjne zmniejszone o 20 – 30% [9, 10].

Z chwilą opracowania programów symulacyjnych procesów zalewania, krzepnięcia i krystalizacji przemysł odlewniczy nabrał nowego kolorytu. Wiele skomplikowanych i niemożliwych do bezpośredniej obserwacji zjawisk fizykochemicznych, występujących podczas zalewania form odlewniczych, można obserwować w przestrzeni modelu komputerowego. Fakt ten niesie za sobą wiele możliwości optymalizacyjnych w kontekście procesów technologicznych. Niemniej jednak szczególnie istotne jest poprawne założenie warunków brzegowych i danych materiałowych symulacji komputerowych. Walidacja wyników symulacyjnych do warunków przemysłowych jest w wielu przypadkach skomplikowanym, wieloaspektowym zagadnieniem z racji złożoności procesów odlewniczych [11].

Proces pełnej formy jest jedną z bardziej skomplikowanych metod wytwarzania w przemyśle odlewniczym. Kinetyka zgazowania modelu, wykonanego najczęściej z wielkocząsteczkowego spienionego polimeru, stawia inżynierom odlewnictwa wiele pytań i wątpliwości [12]. Na jakość gotowego odlewu wpływa wiele parametrów technologicznych, które powinny zostać dobrane na etapie badań laboratoryjnych oraz doświadczalnych. Z punktu widzenia odbiorcy, odlewy powinny charakteryzować się najwyższą jakością pozbawioną jakichkolwiek wad, co w produkcji przemysłowej jest bardzo dużym wyzwaniem. Z pomocą przychodzą programy umożliwiające prognozowanie i analizę zmian zachodzących w formie podczas zalewania.

Obecnie procesy pirolizy jednorazowego modelu odlewniczego zachodzące w formie nie są do końca poznane. Brak odpowiedniej definicji zgazowania takiego modelu, daje wiele możliwości rozwoju tego zagadnienia. Procesy pirolizy

jednorazowych modeli polimerowych mają decydujący wpływ na charakter wypełniania formy metalem oraz na powstawanie wad w odlewach wytwarzanych w procesach pełnej formy [13-15]. Zauważalna jest również swoista „niedoskonałość” algorytmów i modeli stosowanych w programach CAE w przemyśle odlewniczym. Odpowiednia implementacja rzeczywistych warunków procesowych metody pełnej formy, takich jak przepuszczalność formy czy dane dotyczące zastosowanego pokrycia ogniotrwałego, w dostępnych programach symulacyjnych jest obecnie praktycznie niemożliwa. Nagląca potrzeba uzyskiwania odlewów o najwyższej jakości, wymaga od producentów poznania i kontroli procesu technologicznego na każdym jego etapie.

Przeprowadzone badania ukierunkowane były na analizę wpływu poszczególnych parametrów technologicznych na jakość odlewów w procesie pełnej formy. Istotnym zagadnieniem w przeprowadzonych badaniach był proces degradacji termicznej modelu najczęściej wykonanego ze spienionego wielkocząsteczkowego polimeru. Zgazowanie takiego modelu następuje w procesie pirolizy [16-20], który zachodzi w trudnej do zdefiniowania przestrzeni zamkniętej jaką jest wnęka formy, co powoduje, iż te badania można określić mianem wieloaspektowym i złożonym z punktu widzenia fizykochemicznego.

Pierwszy etap dotyczył badań laboratoryjnych, mających na celu określenie parametrów, które bezpośrednio oddziałują na proces wypełniania formy w metodach stosujących jednorazowe modele odlewnicze z tworzyw sztucznych. Uzyskane wyniki laboratoryjne zostały zaimplementowane w programie symulacyjnym, a następnie przeprowadzone zostały liczne symulacje procesu zalewania, krzepnięcia i symulacji dla wielu modeli geometrycznych. Wyniki symulacji zostały porównane z wynikami próbnych wytopów laboratoryjnych dla odlewów o wadze do 5 kg. Wytopy te zostały wykonane w kilku konfiguracjach, w zależności od niektórych parametrów procesu technologicznego. Końcowa walidacja wyników symulacyjnych odbyła się w warunkach przemysłowych w odlewni Rafamet. W ostatnim etapie zostały użyte modele, które w swojej konstrukcji są bardzo zbliżone do odlewów produkcyjnych odlewni Rafamet. Przeprowadzone badania mają charakter wdrożeniowy i mają na celu zwiększenie efektywności procesu pełnej formy stosowanego w odlewni Rafamet.

Czy zatem technologia pełnej formy w dobie kryzysu ekonomicznego i energetycznego jest dobrym rozwiązaniem dla przemysłu odlewniczego?

1. RYS HISTORYCZNY METODY PEŁNEJ FORMY

Pierwsza odnotowana informacja użycia jednorazowego modelu do technologii wytwarzania odlewów miała miejsce w 1956 roku. Wtedy Harnold F. Shroyer opatentował sposób produkcji odlewów przy pomocy modelu z ekspandowanego polistyrenu (EPS) umieszczonego w związanej masie formierskiej [21]. Odlewy wykonywane tą niedopracowaną metodą odznaczały się w tamtych czasach małą dokładnością wymiarowo-kształtową oraz dużą chropowatością powierzchni ze względu na brak użycia pokrycia ogniotrwałego. Dziś proces ten nosi nazwę Full Mold i jest stosowany w wielu odlewniach na całym świecie.

Nowe spojrzenie na technologie Full Mold miał w 1964 roku M. C. Fleming, który użył niezwiązanego piasku do tego procesu [22]. W ten sposób nowa technologia została nazwana Lost Foam Casting (LFC), a proces jako Lost Foam Proces (LFP). Z tego powodu nazwę Lost Foam czy Lost Foam Casting w USA przyjęto do określania klasycznej metody pełnej formy. Jako pierwsi odlewy w tej technologii wykonali amerykańscy odlewnicy, którzy odlali blok silnika z użyciem jednorazowego modelu.

Metoda pełnej formy na przestrzeni kilkudziesięciu lat bardzo mocno się rozwijała. Początkowo proces ten był wykorzystywany do wytwarzania odlewów jednostkowych, a w obecnych czasach jest również używany do produkcji seryjnej [23]. Metoda pełnej formy ma przede wszystkim zastosowanie w procesach zalewania takich stopów jak żeliwo, staliwo, brąz i aluminium. Obecnie w zależności od zakładu produkującego odlewy w technologii pełnej formy przyjęto różną nomenklaturę dotyczącą tego samego procesu [12].

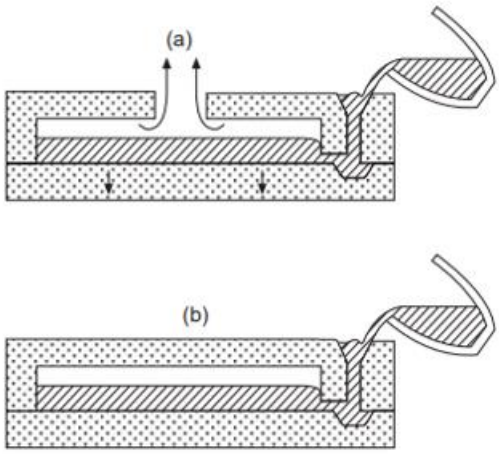
2. PRZEGLĄD LITERATUROWY

2.1. METODA PEŁNEJ FORMY

Wiele korzyści wypływających z technologii pełnej formy wyróżnia ten proces spośród tradycyjnych metod wytwarzania odlewów przy użyciu modeli trwałych. Klienci odlewni coraz częściej wymagają skróconych czasów wykonania odlewów, w związku z czym technologia pełnej formy jest idealnym rozwiązaniem w takiej sytuacji. Czas wykonania modelu jednorazowego jest kilkukrotnie krótszy, aniżeli wykonanie oprzyrządowania wielokrotnego użytku. Dodatkowo modele te w rozrachunku ekonomicznym wypadają zdecydowanie korzystniej. Możliwość stosowania mniejszych naddatków w tej technologii rzutuje na większe uzyski. Szacuje się, iż modele jednorazowe stanowią około 20 – 30% ceny modelu drewnianego. W technologii pełnej formy możliwe jest wyeliminowanie lub ograniczenie stosowania rdzeni, dlatego proces wytwarzania jest korzystniejszy pod względem zmniejszenia ilości operacji. Brak rdzeni oraz podziałów formy, a tym samym brak zalewek, wpływają korzystnie na procesy obróbki gotowego odlewu. Ponadto swoboda pod względem konstrukcyjnym modeli stanowi idealną alternatywę dla wytwarzania prototypowych odlewów.

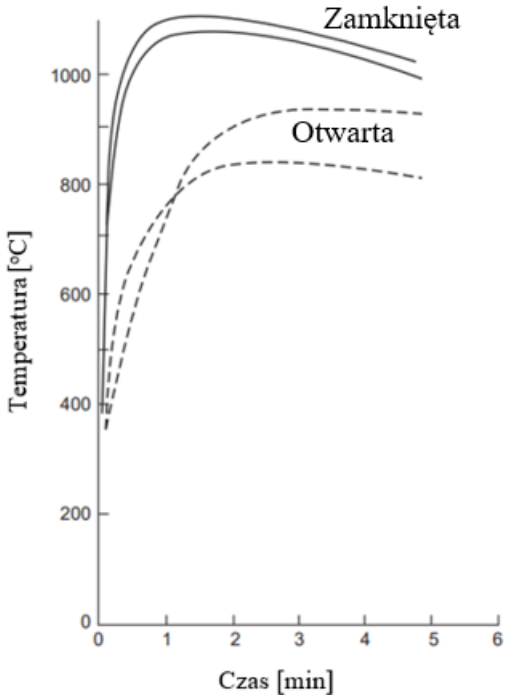
Pierwszy etap technologii pełnej formy skupiony jest na wykonaniu jednorazowego modelu ze spienionego polimeru. Dobór materiału na jednorazowy model odlewniczy jest jednym z podstawowych warunków brzegowych procesu pełnej formy. Obecnie jednym z najpopularniejszych materiałów na takie modele jest spieniony polistyren. Kolejnym etapem jest naniesienie specjalnego pokrycia ogniotrwałego na model, które stanowi barierę ochronną między formą, a ciekłym stopem. Grubość pokrycia ogniotrwałego wpływa znacząco na przepuszczalność formy, która w tej technologii jest niezmiernie istotna.

Zjawiska zachodzące w formie podczas zalewania klasyfikują metodę pełnej formy jako jedną z bardziej złożonych. Zgazowywanie modelu polimerowego podczas zalewania ciekłym stopem, następuje w różnych tempie i dynamice, w zależności od wielu czynników produkcyjnych. Z racji faktu iż w technologii Full Mold stosuje się zamknięte formy ewakuacja gazów jest niezwykle trudnym wyzwaniem. Poniżej przedstawiono schematycznie zalewanie formy otwartej i zamkniętej (Rys. 2.1.1.).



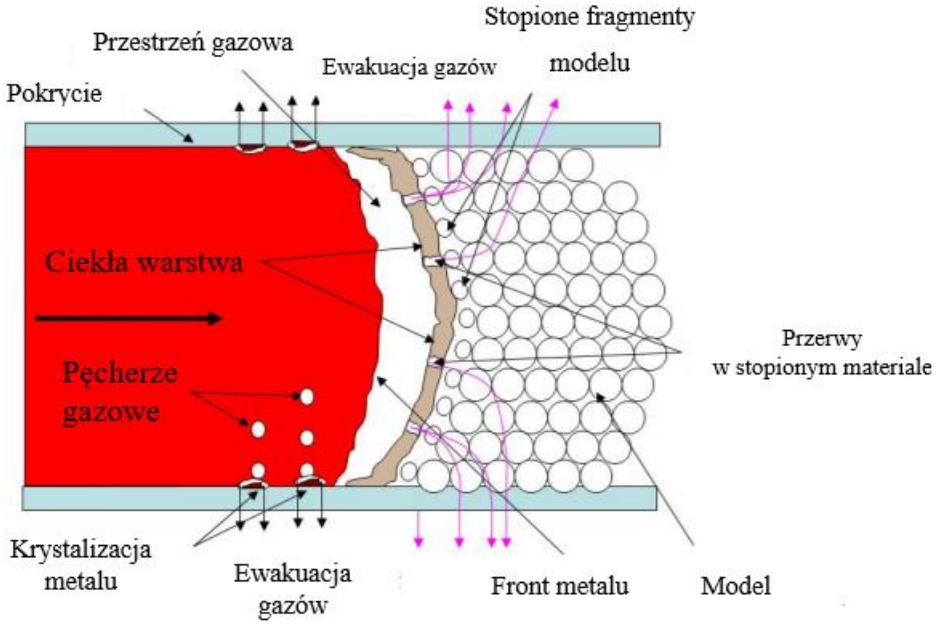
Rys. 2.1.1. Schemat zalewania a) otwartej, b) zamkniętej formy [24]

W odróżnieniu do metody tradycyjnego „wyjmowanego” modelu, w procesie pełnej formy występują zdecydowanie odmienne warunki procesowe. Procesy termiczne występujące w zamkniętej formie są zdecydowanie bardziej złożone w porównaniu do „otwartej” formy. Badania porównawcze dla zalewania otwartej i zamkniętej formy rys. 2.1.1., również potwierdzają ten fakt, o czym świadczy poniższy wykres (rys. 2.1.2.) Temperatury występujące wewnątrz zamkniętej formy są zdecydowanie wyższe aniżeli w porównywalnym procesie zalewania otwartej formy.



Rys. 2.1.2. Różnice temperatur zarejestrowane dla otwartej i zamkniętej formy [25]

Kolejny krok stanowi proces przygotowania układu wlewowego oraz masy wypełniającej, w zależności od stosowanego rodzaju technologii. Krok ten jest jednym z kluczowych etapów technologicznych, między innymi właśnie od niego zależy kinetyka wypełniania wnęki formy. Projektowanie układów wlewowych w technologii pełnej formy musi uwzględniać opory formy wynikające z degradacji termicznej modelu [26]. Schematycznie rozkład modelu polimerowego przedstawiony został na rysunku 2.1.3.



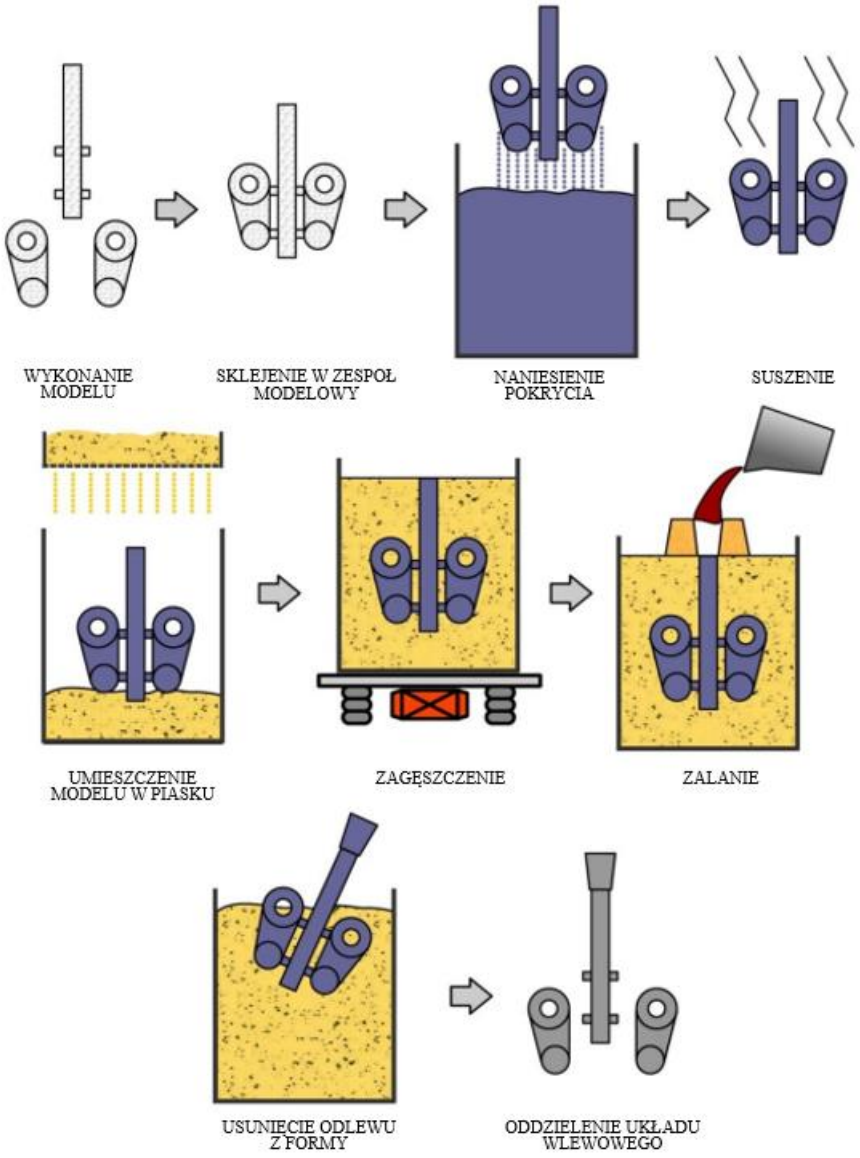
Rys. 2.1.3. Rozkład modelu polimerowego w metodzie pełnej formy [25]

Formowanie w masie formierskiej z użyciem modelu jednorazowego wraz z układem wlewowym jest jednym z ostatnich etapów procesu pełnej formy. Stopień zagęszczenia materiału wypełniającego stanowi bazę do optymalizacji jakości powierzchniowej odlewów wykonanych w tej technologii. Ze względu na niską wytrzymałość mechaniczną modelu jednorazowego na tym etapie produkcyjnym należy zachować szczególną ostrożność z uwagi na niebezpieczeństwo generowania wad odlewów wynikających z uszkodzeń mechanicznych modelu.

Jednym z ostatnich etapów wytwarzania odlewów w technologii pełnej formy jest proces zalewania. Skład chemiczny stopu w dużej mierze wpływa na własności mechaniczne otrzymanego odlewu. Na tym etapie istotne jest również utrzymywanie wymaganego poziomu metalu w zbiorniku wlewowym , który powinien gwarantować właściwe zalewanie, uwzględniając opory wynikające z degradacji termicznej modelu polimerowego.

Końcowy etap produkcji w technologii pełnej formy czyli wybicie i oczyszczenie odlewów stanowi weryfikację prawidłowości procesu produkcyjnego.

Złożoność tej techniki wpływa na trudności uzyskania odlewów pozbawionych wad. Rzetelne podejście do każdego etapu produkcji odlewów i optymalizacja technologii pełnej formy może zmaksymalizować efektywność tego procesu. Schematycznie przebieg wykonania odlewu w metodzie pełnej formy przedstawiono na poniższym rysunku 2.1.4.



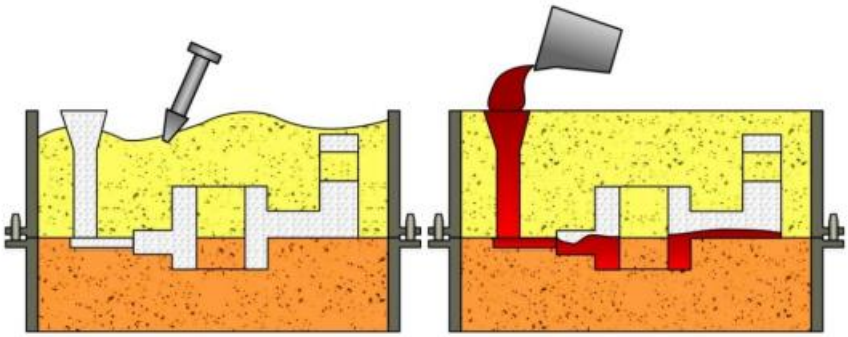
Rys. 2.1.4. Schemat etapów produkcji odlewów w metodzie pełnej formy [12]

2.1.1. RODZAJE METODY PEŁNEJ FORMY

Systematyka procesu pełnej formy w dostępnej literaturze nie jest do końca ujednolicona, ze względu na różne nazewnictwo tych samych lub podobnych technik wytwarzania. Metody wykorzystujące zgazowane modele odlewnicze można znaleźć w literaturze także pod angielską nazwą Evaporative Pattern Casting (EPC) [12]. Ogólna klasyfikacja odlewania przy pomocy modeli spienionych opiera się na różnicach w zastosowaniu masy wypełniającej formę z modelem polimerowym [25].

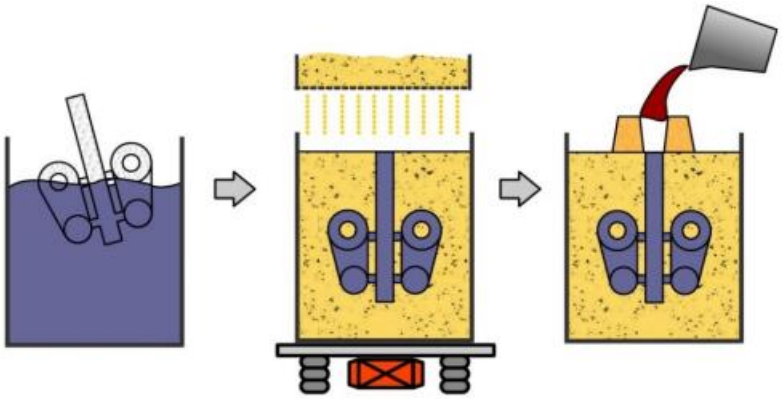
Najpopularniejszy podział wykorzystujący zgazowane modele odlewnicze uwzględnia:

Proces pełnej formy widoczny na rys 2.1.1.1. (Full Mold), w którym modele wykonane są z wielkocząsteczkowych spienionych polimerów. Jednorazowe modele umieszczane w skrzyniach formierskich są zasypywane w klasycznych masach kwarcowych bądź w masach utwardzanych chemicznie.



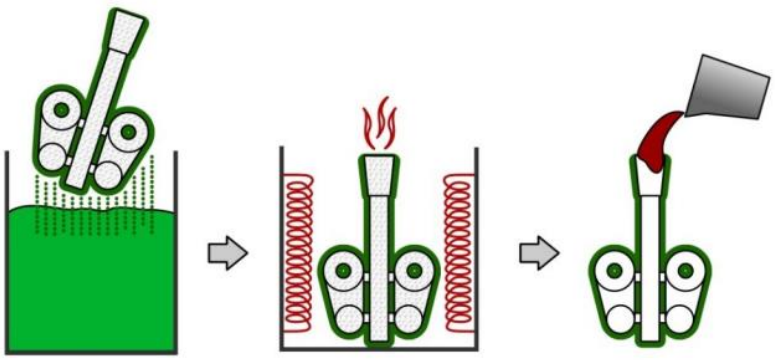
Rys. 2.1.1.1. Schemat procesu Full Mold [12]

Proces Lost Foam widoczny na rys. 2.1.1.2 jest procesem, w którym jednorazowe modele odlewnicze wykonane są ze spienionych polimerów. Wyróżnikiem tego procesu jest zasypanie modelu w suchym piasku bez spoiwa wiążącego. Zwiększenie zagęszczenia niewiązanej masy uzyskuje się poprzez zastosowanie wibracji.



Rys. 2.1.1.2. Schemat procesu Lost Foam [12]

Proces Replicast CS (Ceramic Shell) widoczny na rys. 2.1.1.3. jest procesem, w którym modele ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych, które charakteryzują się dużą dokładnością wymiarowo-kształtową, są montowane w zestawy, na które nanosi się ciekłą warstwę mieszanki ceramicznej. Po kilkukrotnym zanurzeniu naniesioną powłokę poddaje się procesowi suszenia. Forma ceramiczna powstaje po trzy- lub czterokrotnym naniesieniu warstwy mieszanki ceramicznej. Kolejnym etapem jest proces wygrzewania formy w temperaturze 925÷1000°C prze około 5 minut. Model styropianowy (EPS) jest wypalany podczas prażenia, co również prowadzi do utwardzenia formy ceramicznej. Proces replicast (CS) cieszy się coraz większą popularnością i stanowi doskonałą alternatywę dla metody wytapianych modeli. Charakterystyka procesu sprawia, iż modele ze spienionych wielkocząsteczkowych tworzyw sztucznych są lżejsze niż modele wytapiane, przy zbliżonej dokładności wymiarowo-kształtowej [12].



Rys. 2.1.1.3. Schemat procesu Replicast [12]

2.1.2. MATERIAŁY STOSOWANE NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE

Rodzaj materiału z którego wykonany jest model odlewniczy w metodzie pełnej formy jest jedną z kluczowych zmiennych decydujących o jakości końcowej otrzymanych odlewów. Przemysł odlewniczy prowadzi nieustanne badania dotyczące doboru odpowiedniego materiału na modele stosowane w metodzie pełnej formy. Wysokie wymagania stawiane modelom jednorazowym zwężają grupę możliwych do zastosowania alternatywnych materiałów.

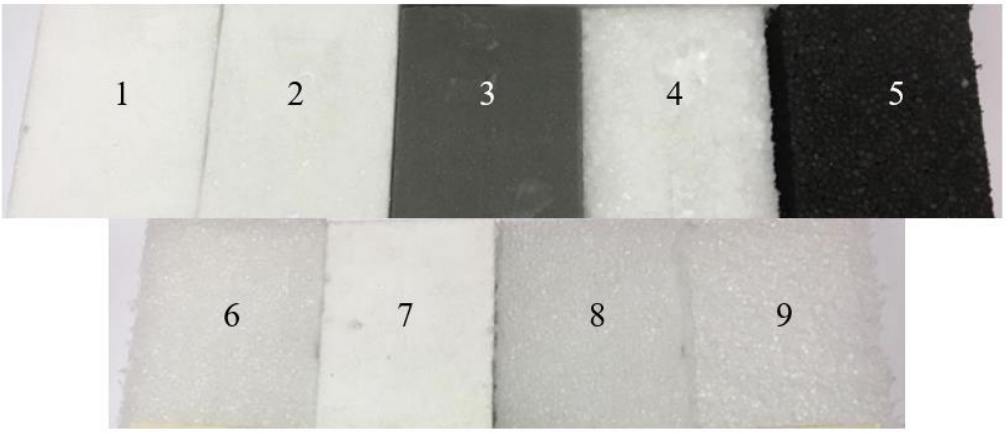
Modele te powinny odznaczać się niską gęstością, z uwagi na proces pirolizy zachodzący podczas zalewnia form, który decyduje o ilości produktów zgazowania modelu. Ponadto degradacja termiczna materiału powinna przebiegać bez pozostawania produktów stałych. Produkty procesu spalania wpływają istotnie na turbulentność zalewania, a tym samym na jakość odlewu. Gęstość modelu jest również mocno związana z możliwościami obróbczymi materiału.

Dodatkowo modele te powinny odznaczać się odpowiednią wytrzymałością mechaniczną, która pozwoli zapewnić wymagane geometrię i jakość powierzchni. Materiał powinien umożliwiać zastosowanie różnego rodzaju obróbki co zwiększa uniwersalność zastosowania danego materiału. Sposób obróbki mechanicznej materiału polimerowego wpływa znacząco na dokładność wymiarową i chropowatość powierzchni. Odmienną jakość powierzchni otrzymuje się podczas obróbki materiału przy pomocy narzędzi frezujących, natomiast przy użyciu obróbki za pomocą rozgrzanych drutów oporowych. Kluczowe jest utrzymanie dużej stabilności wymiarowo-kształtowej co pozwala klasyfikować metodę pełnej formy w gronie technik near net shape.

Obecnie dobierając materiały importowane, należy zwrócić szczególną uwagę na ciągłość łańcucha dostaw oraz cenę. Te dwa czynniki na przestrzeni ostatnich dwóch lat mocno ograniczyły możliwość użycia niektórych materiałów chętnie stosowanych na jednorazowe modele odlewnicze w polskich odlewniach.

Dobór najbardziej efektywnego materiału na jednorazowe modele odlewnicze w metodzie pełnej formy prowadzi do uzyskania odlewów o najwyższej jakości. W przemyśle odlewniczym wielokrotnie podejmowano działania dążące do analizy tworzyw sztucznych mogących mieć zastosowanie w metodach pełnej formy. Zespół

badawczy odlewni Rafamet w badaniach w ramach projektu [PIR.01.01.01-00-0013/20] podjął próbę doboru materiału alternatywnego do tworzywa sztucznego jakim jest szeroko stosowany polistyren spieniony (EPS). W badaniach wyselekcjonowano 9 dostępnych na rynku materiałów (widoczne na rys. 2.1.2.1.) alternatywnych na jednorazowe modele odlewnicze:



Rys. 2.1.2.1. Materiały wyselekcjonowane do badań

1 – EPS (polistyren spieniony) odlewniczy

2 – EPS (polistyren spieniony) budowlany

3 – XPS (polistyren ekstrudowany)

4 – EPP (polipropylen spieniony)

5 – EPP (polipropylen spieniony)

6 – EPE (pianka polietylenowa niesieciowana)

7 – EPS + PMMA (polistyren spieniony + polimetakrylan metylowy)

8 – EPE (pianka polietylenowa niesieciowana)

9 – EPE (pianka polietylenowa niesieciowana)

Jednak obecnie jednym z najczęściej stosowanych materiałów na jednorazowe modele odlewnicze jest polistyren spieniony (EPS) [27]. Powszechnie stosowana nazwa tego materiału to styropian. Wiele korzyści, które posiada polistyren decyduje o dużym zainteresowaniu odlewni polskich jak i światowych tym materiałem. Niestety materiał ten posiada pewne wady, m.in. małą stabilność wymiarową, która jest wynikiem

stopniowej utraty środka spieniającego podczas przechowywania tego materiału. W przeprowadzonych badaniach materiał z którego wykonano większość omodelowania na jednorazowe modele stanowił materiał EPS dedykowany dla branży odlewniczej.

2.1.3. POLISTYREN EKSPANDOWANY

Polistyren ekspandowany (EPS), którego polska nazwa handlowa to styropian, jest szeroko stosowanym tworzywem sztucznym w przemyśle spożywczym, budowlanym jak również odlewniczym. Powstaje w wyniku procesu polimeryzacji styrenu poddawanego następnie spienianiu. Pierwsze odnotowane zastosowanie materiału inżynierskiego jakim był polistyren odnotowano na początku XX wieku w Niemczech.

Polistyren posiada szereg zalet z punktu widzenia inżynierskiego i odlewniczego. W kontekście modeli jednorazowych w metodzie pełnej formy polistyren ulega praktycznie całkowitej degradacji i rozkładowi do produktów gazowych [28]. Polistyren w temperaturach poniżej 300°C degraduje się na zasadzie zmniejszenia stopnia polimeryzacji. Natomiast w wyższych temperaturach zauważalny jest duży spadek masy cząsteczkowej [29]. Ważnym aspektem jest również skład chemiczny polistyrenu. Polistyren stosowany w branży budowlanej może zawierać w swojej strukturze środki ograniczające palność, które negatywnie mogą wpływać na proces pełnej formy.

Kolejny aspekt przemawiający za stosowaniem materiału jakim jest EPS na jednorazowe modele odlewnicze to fakt łatwego procesu obróbki i przygotowania zespołu modelowego. Materiał ten w bardzo łatwy sposób może zostać poddany obróbce mechanicznej przy użyciu maszyn CNC jak również ploterów termicznych. Wpływa to bardzo korzystnie na czas wykonania takiego modelu, a tym samym na skrócenie czasu realizacji wykonania odlewów w technologii pełnej formy.

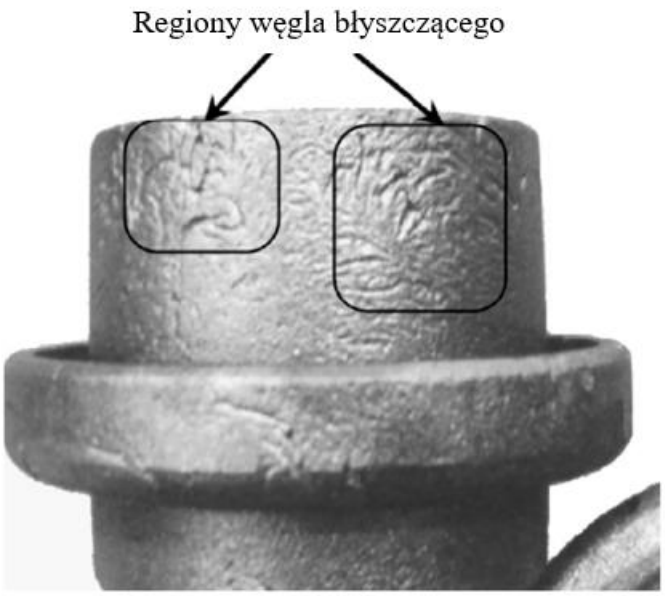
Dostępność polistyrenu ekspandowanego na rynku polskim jest wysoka. Dodatkowo w krajach zachodnich oferowane są materiały w postaci polistyrenu ekspandowanego dedykowanego dla przemysłu odlewniczego. Materiał ten w swoim składzie chemicznym posiada minimalne ilości środków negatywnie wpływających na proces pełnej formy. Również czynnik ekonomiczny przemawia za stosowaniem materiału EPS jest to materiał relatywnie tani.

2.1.4. WADY ODLEWÓW W PROCESIE PENEJ FORMY

Ze względu na dużą złożoność kinetyki rozkładu modelu polistyrenowego oraz procesu wypełniania wnęki formy w technologii pełnej formy istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia wad odlewniczych [30-37]. Modelowanie i analiza procesu zalewania, krzepnięcia i krystalizacji w dużym stopniu może zminimalizować występowanie wad odlewniczych charakterystycznych dla tej technologii. Warstwa węgla błyszczącego jest wadą powierzchniową, charakterystyczną dla procesów w których mamy do czynienia z modelami, które zostają zgazowywane w formie podczas zalewania. Wady powierzchniowe są najczęściej wynikiem nieodpowiednio zaprojektowanej technologii dla metody pełnej formy, często wręcz kopiowana jest technologia dla modelu wyjmowanego. Turbulentność wypełniania wnęki formy w połączeniu z efektami pirolizy w trakcie zgazowania modelu polistyrenowego mogą generować wady powierzchniowe pochodzenia gazowego .

W związku z powyższym w procesie pełnej formy jednym z kluczowych zagadnień jest prawidłowe odprowadzenie gazów z wnęki formy. W technologii tej powszechnie stosowane są zamknięte formy. Zabieg ten pozwala w dużym stopniu zminimalizować emisję niekorzystnych dla środowiska produktów wypalania modelu do atmosfery. Stwarza to dodatkowe ograniczenia w porównaniu do tradycyjnego procesu odlewania przy pomocy modelu „wyciąganego” gdzie stosowane są dodatkowe elementy układu zalewania ułatwiające odprowadzenie gazów z wnęki formy.

Jedną z najczęstszych wad w procesie pełnej formy jest warstwa węgla błyszczącego. Wada ta powstaje podczas zalewania formy, gdy węglowodory uwolnione ze spoiw żywicznych| z mas furanowych, rozkładają się na powierzchni cieczy metalu wydzielając węgiel i wodór. Powierzchnia pirolityczna zwana węglem błyszczącym, z dużym prawdopodobieństwem tworzy się na tlenkach żelaza i krzemu, które formują się na powierzchni metalu. Tym samym warstwa węglowa pozostaje pomiędzy stopem a formą. Węgiel błyszczący widoczny na rysunkach 2.1.4.1. oraz 2.1.4.2., pojawia się w odlewach w postaci miejsc o pomarszczonej błyszczącej powierzchni[38-40]. Wada ta w literaturze jest porównywana do skóry słonia, aligatora lub kurzych łapek. Należy jednak odróżnić wadę w postaci węgla błyszczącego od podobnych defektów wynikających z wtrąceń pozostałości sferoidyzacji [40].



Rys. 2.1.4.1. Wada powierzchni odlewu powstała w metodzie pełnej formy (LFC) spowodowana wtrąceniami węgla błyszczącego [38]

Rys. 2.1.4.2. Wada węgla błyszczącego [41]

Proces powstawania wady typu węgiel błyszczący jest bardzo skomplikowany, złożony i nie do końca poznany, co powoduje, że jest to defekt, któremu bardzo trudno zapobiegać. Badania pod kierownictwem profesora Jezierskiego analizujące wpływ wybranych czynników technologicznych na powstawanie wady stwierdzają, iż

temperatura zalewania jest jednym z kluczowych parametrów wpływających na ten typ wady w technologii pełnej formy dla żeliwa [41].

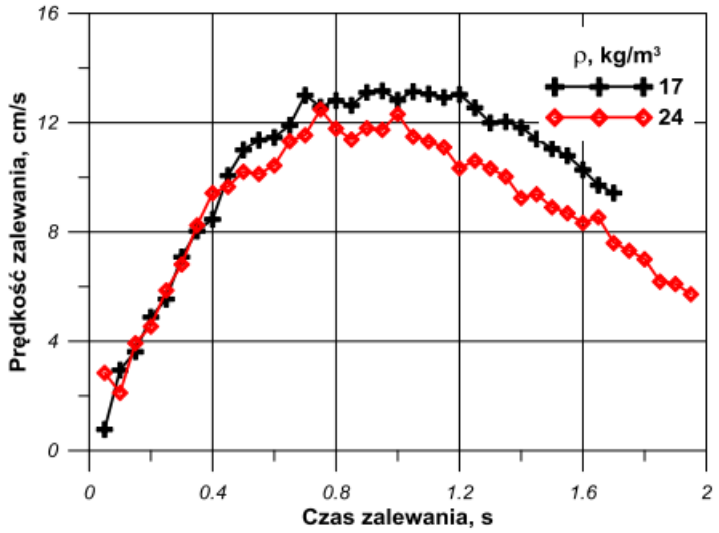
W przypadku odlewnictwa wielkogabarytowego utrzymanie odpowiedniej temperatury zalewania jest niezwykle istotne w perspektywie odlewów kilkudziesięciotonowych. Zalewanie form z temperatury niższej od wymaganych wartości prowadzi do zwiększenia prawdopodobieństwa wystąpienia wad powierzchniowych, które widoczne są na rysunku 2.1.4.3. Ponadto skład chemiczny stopu również ma istotny wpływ na występowanie wad powierzchniowych odlewów, a sterowanie tym parametrem w warunkach przemysłowych jest bardzo ograniczone, a w wielu przypadkach wręcz niemożliwe. Przebieg procesów w trakcie zalewania w przestrzeni pomiędzy ciekłym żeliwem, a modelem polistyrenowym jest również bardzo ważnym zagadnieniem w kontekście formowania się defektu w postaci węgla błyszczącego. [41].

Rys. 2.1.4.3. Wada węgla błyszczącego na powierzchni odlewu wielkogabarytowego

2.1.5. PARAMETRY TECHNOLOGICZNE W PROCESIE PEŁNEJ FORMY

Proces pełnej formy jest technologią, która ze względu na swoją charakterystykę i użyte materiały jest klasyfikowana jako skomplikowana metoda wytwarzania odlewów. Wiele czynników technologicznych wpływa w mniejszym lub większym stopniu na jakość końcowy odlewów [42-43]. Poczynając od konstrukcji odlewu, który decyduje o charakterystyce procesu krzepnięcia, jak również o konieczności zastosowania zabiegów technologicznych w celu wpływu na krystalizację. Celna prognoza jednorodności struktury odlewu jest możliwa dzięki odpowiednim założeniom pre-

procesingu w programach symulacyjnych [44]. Niestety w wielu przypadkach produkcyjnych, technolodzy odlewniczy nie mają możliwości ingerencji w konstrukcje modelu lub negocjacje konstrukcyjne są bardzo utrudnione. Kompromis na linii konstruktor – technolog odlewnik może prowadzić do efektu minimalizacji powstawania wad w odlewach, co jest niezmiernie istotne w procesie pełnej formy, kiedy warunki fizykochemiczne podczas zalewania są skomplikowane. Gęstość modelu, najczęściej wykonanego z polistyrenu ekspandowanego decyduje o ilości produktów gazowych generowanych w czasie termicznej degradacji modelu [45-47]. Im mniejsza gęstość takiego modelu, tym teoretycznie mniejsza ilość gazów do ewakuacji. Gęstość modelu ma również wpływ na prędkości zalewania formy. Dla żeliwa im mniejsza jej wartość tym prędkości zalewania wzrastają co widoczne jest na rys 2.1.5.1.[7].



Rys. 2.1.5.1. Przebieg zmian prędkości zalewania w zależności od gęstości modelu polistyrenowego dla żeliwa [12]

Nie mniej jednak gęstość materiału powinna być na tyle duża, aby zapewnić materiałowi modelu odpowiednie własności mechaniczne podczas procesu obróbki i formowania. Jakość powierzchni modelu odgrywa dużą rolę w ostatecznej jakości powierzchni odlewu [48]. Jednym z najbardziej popularnych procesów kształtowania modeli polistyrenowych dla odlewnictwa jednostkowego wielkogabarytowego jest obróbka bloków na obrabiarkach sterowanych numerycznie.

W technologiach które stosują jednorazowe modele odlewnicze, w czasie zalewania form ciekłym metalem następuje złożony proces degradacji termicznej modelu polimerowego. Ciekły stop podczas kontaktu z modelem powoduje jego rozkład na

produkty gazowe, które powinny być ewakuowane z formy, przy zachowaniu odpowiednich warunków brzegowych tego procesu. Między frontem ciekłego metalu, a modelem polistyrenowym powstaje szczelina gazowa, zwana również strefą kinetyczną, od której w dużym stopniu zależy wielkość i charakter wad odlewniczych [49-57].

Temperatura metalu, objętość i szybkość degradacji modelu polistyrenowego mają znaczący wpływ na charakter wypełnienia formy. Intensywność ewakuacji gazów, jak również wielkość szczeliny gazowej są jednymi z decydujących parametrów wpływających na szybkość i turbulentność wypełniania wnęki w metodzie pełnej formy [16]. Objętość wydzielanych gazów w trakcie zalewania zwiększa się ze względu na rozszerzalność termiczną, co utrudnia ewakuację gazów [58]. Zespół Mocek J., Chojecki A**.** stwierdzają, iż dla odlewania odlewów żeliwnych ciśnienie występujące w formie jest wyższe, aniżeli dla innych stopów. Wynika to z szybszej degradacji modelu, co wynika z wyższych temperatur zalewania [59].

Również technologia formy odgrywa znaczącą rolę w procesach pełnej formy. W związku z wymogiem dostatecznej gazoprzepuszczalności formy parametry takie jak wielkość ziarna osnowy masy formierskiej, rodzaj i grubość pokrycia ogniotrwałego muszą spełniać wymagane warunki dla tego procesu.

Ze względu na zwykle złożoną konstrukcję modelu polistyrenowego konieczne jest również zachowanie odpowiednich czasów wiązania masy formierskiej. Wymagana żywotność masy formierskiej powinna zapewniać wystarczający czas do zagęszczenia masy formierskiej. W warunkach produkcyjnych parametr ten może powodować wiele komplikacji ze względu na zmieniające się warunki atmosferyczne na przestrzeni całego roku. Wraz ze wzrostem temperatury osnowy masy formierskiej w okresie letnim następuje skrócenie czasu wiązania poprzez zwiększenie szybkości procesu wiązania. Odwrotna sytuacja ma miejsce w okresie zimowym, kiedy spada temperatura osnowy masy, wpływa to na wydłużenie czasu wiązania nawet kilkukrotnie. Z reguły wydłużenie tego czasu jest korzystne przy zachowaniu ciągłości planu produkcji [60]. Dodatkowo aby zachować odpowiednią wytrzymałość masy formierskiej wskazane jest zagęszczanie przy pomocy wibracji w celu zwiększenia efektywności procesu [61]. Natomiast jest to bardzo utrudnione w procesie pełnej formy w przypadku odlewów wielkogabarytowych.

W metodzie pełnej formy jednym z kluczowych zagadnień jest zdolność gazów do ewakuacji z wnęki formy. Ilość gazów wydzielanych z masy formierskiej podczas

kontaktu na granicy forma – metal jest powiększona o wielkość produktów gazyfikacji modelu polistyrenowego. Uzyskanie zatem odpowiedniej gazoprzepuszczalnośći może zmniejszyć prawdopodobieństwo występowania charakterystycznych dla tej technologii wad powierzchniowych odlewów. Wyniki badań dostępne w literaturze potwierdzają fakt, iż zwiększenie przepuszczalności formy odgrywa kluczową rolę w eliminacji niezgodności powierzchniowych odlewów [16, 62-66].

W odlewnictwie wielkogabarytowym bardzo często stosowanym materiałem osnowy masy formierskiej jest regenerowany piasek kwarcowy. Dobór tego materiału jest uwarunkowany ilością zapotrzebowania osnowy, jak również aspektem ekonomiczny. Regenerat może zostać użyty kilkukrotnie w cyklu produkcyjnym co generuje znaczące korzyści ekonomiczne w porównaniu do zastosowania wyłącznie świeżego piasku kwarcowego. W dostępnych w literaturze [67, 68] wynikach badań nad jakością regeneratu w osnowie masy formierskiej, autorzy podkreślają iż dodatek piasku „odzyskanego” w zbyt dużych proporcjach wpływa negatywnie na jakość odlewów. Proporcja świeżego piasku do regenerowanego powinna być wyznaczana doświadczalnie w warunkach odlewni na podstawie rodzaju masy i wymaganych własności technologicznych.

W metodzie Full Mold odmienne jest nanoszenie pokrycia w porównaniu do innych metod wytwarzania odlewów. Mianowicie pokrycie aplikowane jest bezpośrednio na model polistyrenowy. Dla odlewnictwa jednostkowego wielkogabarytowego bardzo często stosowaną metodą pokrycia jest natrysk. Grubość pokrycia ma bardzo duże znaczenie w kontekście wpływu na przepuszczalność formy. Wymagana warstwa powinna odpowiednio zabezpieczać model przed penetracją metalu do masy formierskiej przy zachowaniu odpowiedniego parametru przepuszczalności. Zagadnienie to stanowi temat wielu badań i analiz inżynierów odlewnictwa. W publikacjach [69, 70] w oparciu o uzyskane wyniki badań stwierdzono zależność: im cieńsza była warstwa pokrycia ogniotrwałego, tym szybkość ewakuacji gazów była wyższa. Dzięki tym wynikom analizy, dowiedziono iż cieńsza warstwa pokrycia ogniotrwałego zastosowanego na modelu wpływa korzystnie na zmniejszenie turbulentności wypełnienia wnęki formy w wyniku ograniczonej przepuszczalności formy, przy dodatkowych korzyściach w mikrostrukturze stopu aluminium. Również w publikacji [71] autorzy podkreślają wpływ grubości pokrycia ochronnego na ograniczenie przepuszczalności formy, co może powodować występowanie miejscowych wad gazowych w odlewach. Jamrozowicz Ł.,

Siatko A. podkreślają znaczący wpływ dwóch czynników technologicznych na przepuszczalność. Jest to wielkość ziarna osnowy masy formierskiej oraz grubość pokrycia ogniotrwałego.

2.2. SYMULACJE PROCESU PEŁNEJ FORMY

Oprogramowanie komputerowe, jest pomocne w działaniach związanych z projektowaniem i symulacją procesów technologicznych. Zastosowanie modelowania komputerowego pozwala przeprowadzać nieograniczoną liczbę symulacji, co może korzystnie wpłynąć na logistykę oraz zakres procesu technologicznego przy braku ingerencji w rzeczywisty proces. Programy symulacyjne, narzędzia analityczne oraz statystyki wykonanych wersji symulacji dają użytkownikowi przewagę w szybkim i rzetelnym podejmowaniu decyzji na początkowych etapach procesów produkcyjnych [72].

Proces poprawy jakości odlewów odbywa się nieustannie w zakładach odlewniczych. Wysokie wymagania konsumentów stawiają odlewnie przed wymogiem ciągłego doskonalenia procesów produkcyjnych. Minimalizacja brakowości odlewów ma bardzo duże znaczenie w kontekście ekonomiki produkcji. Zabiegi logistyczne umożliwiające dostosowanie produkcji do zapotrzebowania rynkowego w wielu przypadkach jest bardzo uciążliwą procedurą, oscylującą na granicy opłacalności.

Wiodące programy symulacyjne, przeznaczone do analizy wypełniania wnęki formy, w przemyśle odlewniczym w ostatniej dekadzie zostały znacząco udoskonalone [73-81]. Jednakże symulacje komputerowe procesu pełnej formy w odróżnieniu od tradycyjnych technologii nadal są w fazie intensywnego rozwoju i są nieustannie doskonalone [82, 83]. Jest to nadal aktualny temat wymagający badań, ciągłej analizy i poszerzenia wiedzy w zakresie zjawisk podczas zalewania, krzepnięcia i krystalizacji w procesach z zastosowaniem jednorazowych modeli odlewniczych. Wielu producentów oprogramowania symulacyjnego daje możliwość odpowiedniej konfiguracji systemu pod kątem doboru odpowiednich dla potrzeb klienta modułów obliczeniowych. Tabela 2.2.1. przedstawia główne moduły popularnych programów symulacyjnych, jak widać tylko nieliczne oferują możliwość symulacji procesu pełnej formy [84].

Tabela 2.2.1. Zestawienie programów symulacyjnych dla przemysłu odlewniczego [81]

Nazwa	Kraj	Metoda obliczeniowa	Zastosowanie
Flow 3D	USA	FVM/FDM	Odlewanie do form piaskowych, odlewanie ciśnieniowe, LFC, odlewanie odśrodkowe, odlewanie ciągłe
MagmaSoft	Niemcy	FDM/FEM	Odlewanie do form piaskowych, odlewanie skorupowe, odlewanie ciśnieniowe, LFC, odlewanie metodą traconego wosku, odlewanie kokilowe
Procast	Francja	FEM	Odlewanie do form piaskowych, odlewanie skorupowe, odlewanie niskociśnieniowe, LFC odlewanie metodą traconego wosku, odlewanie odśrodkowe
Adstefan	Japonia	FEM	Odlewanie ciśnieniowe, odlewanie do form piaskowych
InteCast	Chiny	FDM	Odlewanie do form piaskowych, odlewanie skorupowe, odlewanie ciśnieniowe, odlewanie metodą traconego wosku, odlewanie kokilowe

gdzie:

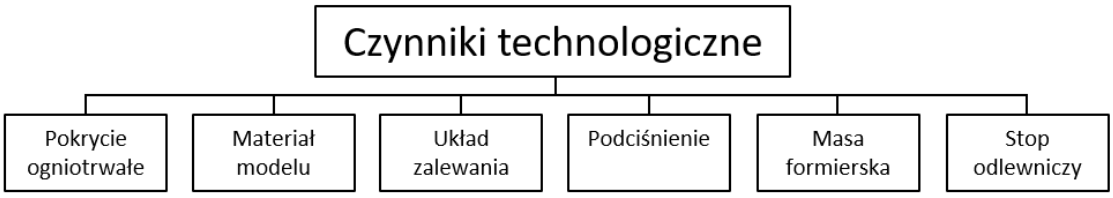
FVM - metoda skończonej objętości jest metodą reprezentowania i oceny równań różniczkowych cząstkowych w postaci równań algebraicznych [85],

FDM - metoda różnic skończonych jest numeryczną metodą rozwiązywania równań różniczkowych polegająca na przybliżeniu pochodnej funkcji ilorazami różnicowymi w zdyskretyzowanej przestrzeni [86],

FEM - metoda elementów skończonych, która jest zaawansowaną metodą numerycznego rozwiązywania problemów brzegowych, polegająca na zastosowaniu interpolacji poszukiwanej funkcji, na dyskretnym zbiorze jej węzłów, które powstają dzięki dyskretyzacji dziedziny jej określoności na zwane potocznie elementy skończone [87-89].

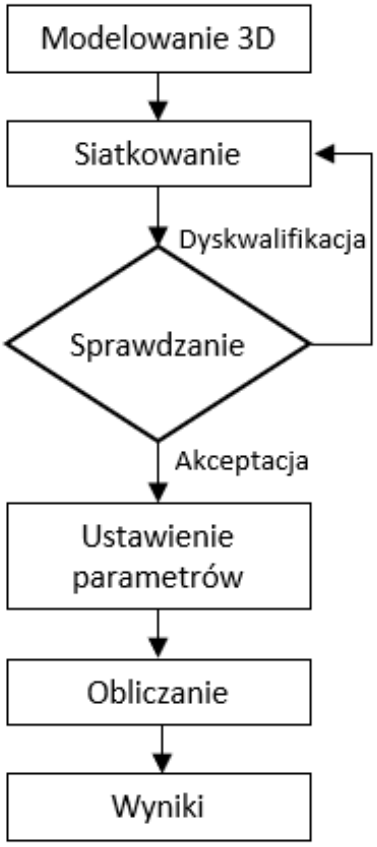
Jednakże w procesach pełnej formy konieczne jest precyzyjne zdefiniowanie warunków brzegowych procesu zalewania, krzepnięcia i krystalizacji oraz danych

materiałowych. Wiele czynników technologicznych wpływa na warunki fizykochemiczne w formie odlewniczej podczas degradacji termicznej modelu z tworzywa sztucznego wielkocząsteczkowego co widoczne jest na rys. 2.2.1. [84, 90-93].



Rys. 2.2.1. Czynniki technologiczne wpływające na warunki symulacji wypełniania formy w technologii pełnej formy [84]

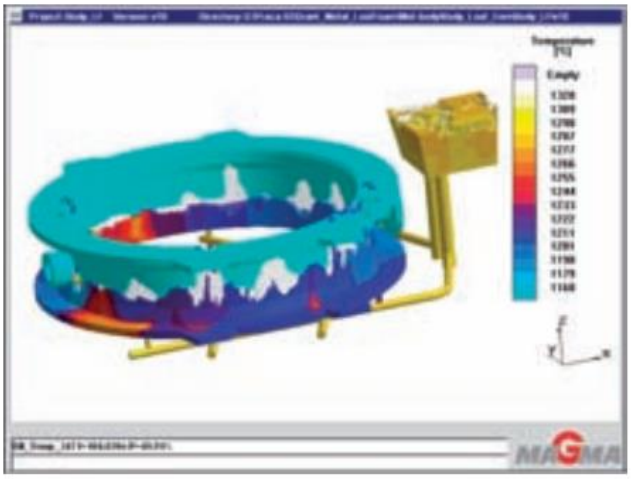
Przebieg procesu symulacji powinien przebiegać według określonego schematu. Ogólny schemat symulacji komputerowej przedstawiono na rys. 2.2.2. w formie schematu blokowego.



Rys. 2.2.2. Ogólny schemat blokowy procesu symulacji [84]

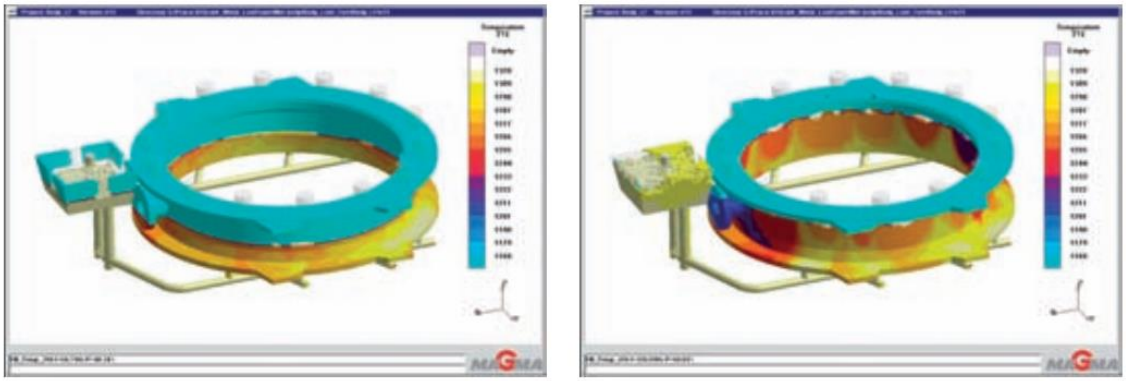
Badania symulacyjne metody pełnej formy przeprowadzone w Centrum Polskiego Odlewnictwa w Krakowie potwierdzają, iż duży wpływ na jakość odlewów ma sposób doprowadzenia metalu do wnęki formy, odprowadzenie gazów z wnęki formy jak również własności termofizyczne samego modelu jednorazowego [94]. Pomocne w tym przypadku stają się programy symulacyjne, które dają możliwość szybkiej analizy wielu parametrów podczas zalewania form. Jednym z nich jest temperatura metalu podczas zalewnia, która jest istotną informacją pod kątem krzepnięcia krystalizacji.

Wykonane pod przewodnictwem Centrum Polskiego Odlewnictwa w Krakowie badania symulacyjne wskazują konieczność zastosowania różnych układów doprowadzenia metalu do wnęki formy w technologii tradycyjnej bez modelu polistyrenowego i dla modelu polistyrenowego. Badania dotyczyły odlewu wielkogabarytowego pierścienia z żeliwa sferoidalnego o masie 6700 kg. Symulacja procesu zalewania układu bez zastosowania modelu polistyrenowego wykazała, że czas wypełniania wnęki formy wynosił około 200 sekund dla sumy przekrojów wlewów doprowadzających wynoszących 157 cm^2 dobranych na etapie obliczeń założeń technologicznych. Natomiast wyniki symulacji dla tych samych parametrów przy użyciu modelu polistyrenowego, wykazały duży spadek temperatury, który widoczny jest na rys. 2.2.3. W 104 sekundzie nastąpiło bardzo niebezpieczne zjawisko, mianowicie widoczny jest spadek temperatury metalu poniżej temperatury likwidusu, co może skutkować zbyt wczesnym zakrzepnięciem metalu [94]. Na rys. 2.2.3. widoczne jest również nierównomierny stopień degradacji termicznej modelu polistyrenowego, który jest charakterystyczny dla tej technologii w przypadku nieodpowiedniej konstrukcji układu wlewowego.



Rys. 2.2.3. Rozkład temperatury w 104s zalewania [94]

Rozwiązaniem w przedstawionym przykładzie było zwiększenie przekrojów wlewów doprowadzających o ponad 150% do wartości 400 cm^2, co poskutkowało zapełnieniem wnęki formy bez zagrożenia znaczącym spadkiem temperatury, widoczne jest to na rys.2.2.4. [94].

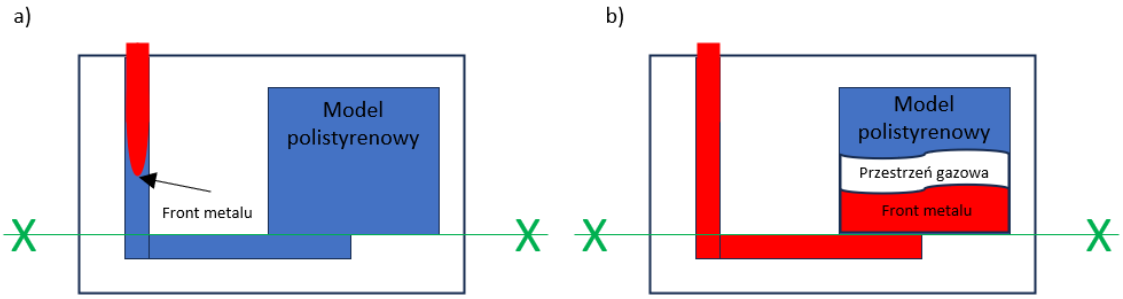


Rys. 2.2.4. Rozkład temperatury dla układu ze zwiększonymi wlewami doprowadzającymi [94]

Z pewnością wpływ na tempo zalewania miał proces pirolizy modelu polistyrenowego. Gazy powstające w wyniku wypalenia modelu jednorazowego wiążą się z dodatkowym oporem przepływu ciekłego metalu we wnęce formy. Jest to bardzo istotna wiedza w kontekście projektowania technologii pełnej formy, która powinna być uwzględniana przez technologów odlewników.

3. PIROLIZA MODELU POLISTYRENOWEGO

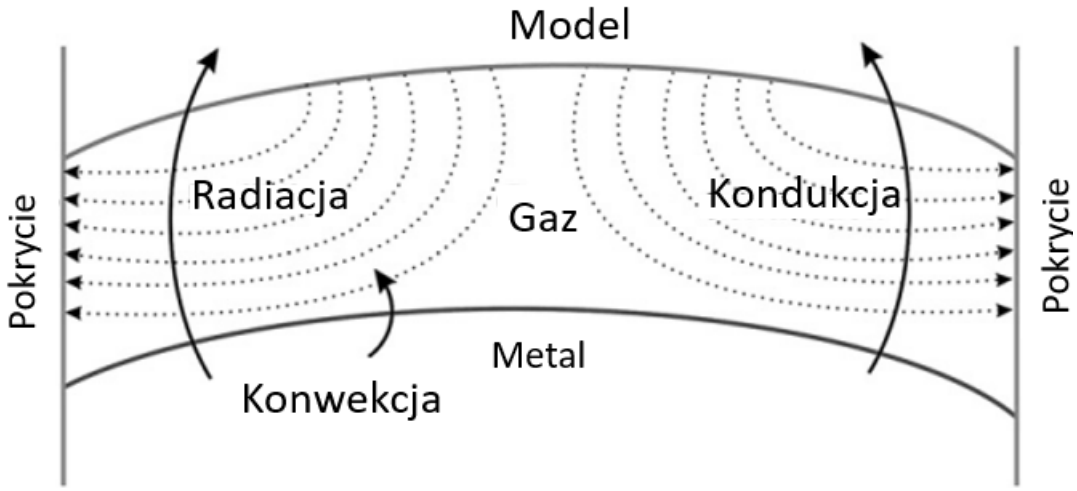
Rozpatrując zagadnienie pirolizy modelu polistyrenowego w formie odlewniczej należy zastanowić się nad poprawnością stosowanej nomenklatury. Mianowicie w pierwszej fazie wypełniania, gdy front ciekłego metalu wpada grawitacyjne do układu wlewowego (pod warunkiem, że układ wlewowy wykonany jest również z polistyrenu) należy rozpatrywać degradację termiczną w postaci procesu spalania. Natomiast jeżeli front/lustro ciekłego metalu wypełni całościowo układ wlewowy i nastąpi „zalewanie” modelu, wtedy oddziaływanie termiczne będzie w sposób nierównomierny zgazowywać polistyren. Dodatkowo tworząc przestrzeń gazową między frontem, a modelem. W takim przypadku można mówić o pirolizie, która jest ściśle powiązana z promieniowaniem termicznym. Schematyczny widok tego procesu przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schemat pirolizy w a) pierwszej fazie wypełniania, b) dalszy etap wypełniania

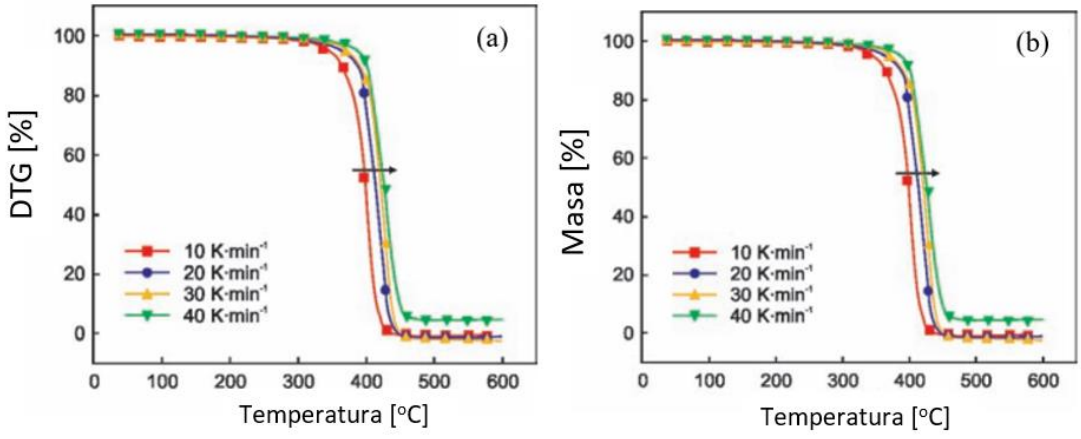
Rozkład termiczny polimeru nie zależy wyłącznie od właściwości fizycznych i chemicznych materiału, ale również od takich parametrów jak geometria i warunki zewnętrzne. Odmienne produkty rozkładu identycznego polimeru mogą być wynikiem zróżnicowanej temperatury pirolizy lub zmiennych warunków procesowych między innymi ciśnienia. Degradacja termiczna modelu polistyrenowego jest zależna od takich czynników zewnętrznych jak kształt i wielkość próbki, sposób spalania, otoczenie i wentylacja. Jednakże należy pamiętać o tym, iż rozkład termiczny podczas badań laboratoryjnych może się różnić od warunków procesowych w jakich zachodzi piroliza [28].

Również zauważalny jest wpływ kilku czynników technologicznych na proces pirolizy w czasie zalewania form w technologii pełnej formy. Czynniki, które najbardziej wpływają na przebieg tego procesu to m.in.: przepuszczalność gazowa masy formierskiej i pokrycia ogniotrwałego, gęstość i kształt modelu jednorazowego, temperatura metalu, ciśnienie metalostatyczne. Szybkość degradacji termicznej modelu polistyrenowego i wielkość ciśnienia w formie zależy od wymiany ciepła pomiędzy modelem, a frontem ciekłego metalu [95]. Zgodnie z II zasadą termodynamiki wymiana ciepła następuje z metalu, który posiada wyższą temperaturę, do modelu polistyrenowego. Wymiana ta następuje do momentu gdy oba ciała osiągną równowagę stanu termicznego. W przypadku technologii pełnej formy po zalaniu, w trakcie krzepnięcia, rozpatrywany jest, podobnie jak w klasycznej technologii z wyjmowanym modelem, układ odlew – forma. Wynika stąd, że najistotniejszym z punktu widzenia różnic metody pełnej formy i klasycznego formowania etapem wykonania odlewy jest proces wypełniania formy. Sposoby wymiany ciepła takie jak przewodzenie, konwekcja i promieniowanie występujące w formie podczas zalewania w technologii pełnej formy widoczne są schematycznie na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Model wymiany ciepła w czasie zalewania w technologii pełnej formy [95]

Wyniki badań termograwimetrycznych dostępne w artykule opracowanym przez Xi Li [13], stwierdzają fakt, iż im szybsze ogrzewanie badanego polistyrenu (EPS) tym większa ilość pozostałości po pirolizie. Jest to uwarunkowane tym, że część produktów zgazowania polistyrenu przy szybszym nagrzewaniu może nie zostać poddane całkowitej pirolizie w celu wytworzenia sadzy. Zgodnie z krzywymi TG widocznymi na rys. 3.3. (b) temperatury dla maksymalnego ubytku masy w modelu (EPS) wynosiły 500°C. Natomiast dla krzywych DTG rys. 3.3. (a) zgazowanie polimeru rozpoczyna się w temperaturze 310°C, a końcowa faza sięga temperatury 500°C. Wskaźnik utraty EPS wzrasta wraz z szybkością ogrzewania.



Rys. 3.3. Krzywe ubytku masy polistyrenu w różnych szybkościach nagrzewania, a) DTG, b) TG [11]

Warunki termiczne występujące w formie w czasie zalewania w procesach pełnej formy są z reguły łatwe do zmierzenia i zbadania. Dostępne programy symulacyjne również dają możliwości uzyskania precyzyjnej analizy wyników rozkładu temperatury

w czasie dla technologii pełnej formy. Umożliwia to weryfikację danych i walidację modelu. Prowadzi to do zwiększenia efektywności procesów przy możliwej minimalizacji kosztów, co może korzystnie wpłynąć chociażby na konkurencyjną cenę odlewów. Niemniej jednak w procesach pełnej formy w dalszym ciągu wiele wątpliwości budzi piroliza pod kątem ciśnienia w ujęciu ilościowym. Wypalenie modelu polistyrenowego wiąże się z dużą ilością produktów gazowych, które pod względem technologicznym powinny zostać wyprowadzone z wnęki formy. Na proces ten z pewnością wpływa jakość masy formierskiej i pokrycia ogniotrwałego, które w formie odlewniczej w metodzie pełnej formy stanowią swoistą „barierę” dla gazów. W związku z tym dobranie odpowiedniej przepuszczalności formy w metodzie Full Mold jest dużą szansą na ograniczenie występowania wad pochodzenia gazowego i burzliwego przepływu w wyniku niewłaściwego procesu wypełniania formy, które są dużą bolączką tej technologii. Przedstawiony problem jest niezwykle aktualny i wymagający intensywnych działań w obszarze badawczym istotnym dla wdrożenia efektywnych wniosków w Odlewni Rafamet.

4. TEZY I CELE PRACY

Analiza zasobów literaturowych dotyczących procesu pełnej formy, ze szczególnym naciskiem na mechanizm degradacji termicznej modelu polistyrenowego i ewakuacji gazów, niewątpliwie wskazuje, iż dostępna wiedza nie w pełni wyjaśnia zjawiska zachodzące podczas zalewania formy z modelem jednorazowym. Fakt ten wskazuje na potrzebę podjęcia działań w celu pogłębienia wiedzy na temat specyfiki samego procesu i zjawisk zachodzących w formie odlewniczej, szczególnie na potrzeby symulacji komputerowej procesu pełnej formy. Liczne artykuły naukowe dotyczące procesu pełnej formy obejmują zagadnienia dotyczące wad odlewniczych, co może sugerować o problemach wynikających z braków dostatecznej wiedzy odnośnie zjawisk w czasie zalewania. Niewątpliwie bezpośrednią obserwację zjawisk zachodzących w czasie degradacji termicznej modelu polistyrenowego należy uznać za bardzo trudną, a bez niej analiza wpływu czynników technologicznych na proces pełnej formy jest niemożliwa. Dywersyfikacja analizy procesu zalewania, krzepnięcia i krystalizacji jest możliwa dzięki zastosowaniu programów symulacyjnych. Dzięki nim możliwa jest głębsza analiza poznawcza mechanizmów pirolizy i zgazowania jednorazowych modeli w formach odlewniczych. Niemniej jednak konieczna jest rzetelna weryfikacja danych materiałowych i walidacja wyników oparte na badaniach laboratoryjnych i rzeczywistych próbach w warunkach przemysłowych. Dzięki temu modelowanie komputerowe można wykorzystać zarówno do projektowania i optymalizacji technologii jak i do lepszego i analizy zjawisk zachodzących w formie odlewniczej z modelem jednorazowym.

4.1. TEZY PRACY

W oparciu o przeprowadzony przegląd literatury, ogólnodostępne wyniki badań oraz własne doświadczenie i wiedzę, które zostały nabyte podczas pracy zawodowej i realizacji badań naukowych związanych z procesem Lost Foam, sformułowano następujące tezy:

Teza 1

Możliwe jest określenie wpływu takich zmiennych procesowych technologii Lost Foam jak: rodzaj materiału modelu jednorazowego, masa formierska, pokrycie ogniotrwałe i temperatura metalu na proces wypełniania formy, a tym samym na jakość końcową odlewów.

Teza 2

Zauważalna i możliwa do implementacji w procesie projektowania technologii jest zależność procesu wypełniania formy od stosunku pola powierzchni zewnętrznej modelu (pole ewakuacji gazów z formy) do objętości modelu polistyrenowego (ilość produktów zgazowania modelu).

4.2. CELE PRACY

W celu udowodnienia poprawności tez opracowano założenia projektowe doktoratu wdrożeniowego w postaci planu badawczego. Obszar planowanych badań przedstawiony został we wstępie do niniejszej pracy doktorskiej. Dodatkowo wyznaczone zostały główne cele pracy, zgodnie z którymi przebiegała realizacja działań naukowo – badawczych:

Cel nr 1

Opracowanie koncepcji, zaprojektowanie i budowa stanowiska do zgazowania materiałów na jednorazowe modele odlewnicze, umożliwiającego analizę spalania próbek i rejestracji danych ciśnienia i temperatury w ujęciu ilościowym. Stanowisko powinno umożliwiać w łatwy i precyzyjny sposób pozyskiwanie danych do symulacji procesu pełnej formy.

Cel nr 2

Opracowanie sposobu implementacji danych pozyskiwanych w standardowych badaniach laboratoryjnych w programie symulacyjnym, szczególnie dotyczących zjawisk zachodzących w czasie procesu ewakuacji gazów z wnęki formy w trakcie zgazowania modelu polistyrenowego. Zakłada się, że powinno to znacząco przybliżyć modelowanie komputerowe do rzeczywistych procesów.

Cel nr 3

Opracowanie geometrii odlewu testowego na potrzeby walidacji, uwzględniającego wpływ zgazowania modelu i ewakuacji gazów na stopień wypełnienia formy. Opracowany model powinien umożliwiać porównanie w sposób parametryczny wyników symulacji i prób rzeczywistych, z którymi ściśle powiązana jest przepuszczalność masy formierskiej.

Cel nr 4

Opracowanie geometrii odlewów próbnych do oceny zależność procesu wypełniania formy od relacji pola powierzchni zewnętrznej modelu do objętości modelu

polistyrenowego. Analiza wyników symulacji i prób przemysłowych umożliwi lepsze zrozumienie warunków występujących w formie w czasie wypełniania w metodzie pełnej formy oraz implementację tej wiedzy w procesie projektowania technologii dla tej metody.

Cel nr 5

Praktyczna ocena możliwości implementacji wyników wykonanych badań symulacyjnych i walidacji do warunków przemysłowych. Analiza potencjału wdrożeniowego opracowanej metodyki pozyskiwania danych w badaniach laboratoryjnych, ich weryfikacji i implementacji w symulacji komputerowej na potrzeby projektowania technologii odlewania wielkogabarytowych odlewów w metodzie pełnej formy.

5. MATERIAŁY

5.1 JEDNORAZOWE MATERIAŁY NA MODELE ODLEWNICZE

Materiały wytypowane do ilościowego określenia produktów zgazowania w trakcie badań na autorskim stanowisku do zgazowania modeli jednorazowych, były podzielone na dwie grupy. Pierwsza grupa materiałów posłużyła do badań testujących stanowisko druga zaś do badań zasadniczych. Materiałem dobranym do badań testujących był polistyren ekspandowany budowalny fasadowy EPS 70, który jest szeroko stosowany w metodzie pełnej formy jako tani zamiennik polistyrenu odlewniczego. Dodatkowo w badaniach testujących użyto kleju uniwersalnego polimerowego Tytan oraz dedykowanego do klejenia modeli polistyrenowych w metodzie Full Mold / Lost Foam Kaltkleber 3988 R. Do badań zasadniczych dobrano materiały spienione, które mogą stanowić alternatywę obecnie stosowanego polistyrenu. Tabela 5.1.1. przedstawia zestawienie materiałów zastosowanych w badaniach testujących i zasadniczych.

Tabela 5.1.1. Zestawianie materiałów zastosowanych w badaniach testujących i zasadniczych

BADANIA TESTOWE			
L.p.	Materiał	Zastosowanie kleju	Oznaczenie
1	EPS 70	-	P_4
2	EPS 70	-	P_5
3	EPS 70	-	P_6
4	EPS 70	-	P_7
5	EPS 70	polimerowy	P_8
6	EPS 70	dedykowany FM	P_9
BADANIA ZASADNICZE			
1	EPS VFG18	-	PR_1
2	EPS 70	-	PR_2
3	XPS	-	PR_3
4	EPP	-	PR_4
5	EPE	-	PR_6
6	EPS + PMMA	-	PR_7
7	EPE	-	PR_8

5.2. MATERIAŁY FORMIERSKIE

W celu określenia podstawowych właściwości masy formierskiej w zależności od właściwości komponentów i parametrów procesu przygotowania do przygotowania próbek i w konsekwencji form testowych do badań w kolejnych etapach badań zastosowane zostały następujące materiały formierskie i pomocnicze.

Osnowa

W warunkach przemysłowych odlewni Rafamet stosowana jest masa furanowa, o różnym udziale świeżego piasku o ziarnistości 0,40/0,32/0,20, regeneratu oraz spoiwa. Wynika to z kilku czynników, między innymi z przeznaczenia masy formierskiej, warunków atmosferycznych, czy ze względu na wyniki bieżących badań laboratoryjnych. Ponadto ze względu na geometrię modelu i formy oraz sposób przygotowania i zagęszczania masy formierskiej nie jest możliwe w warunkach produkcyjnych uzyskania formy o jednorodnych parametrach w całej objętości, co z pewnością wpływa na przepuszczalność formy. Ze względu na te fakty w zrealizowanych badaniach próbki masy formierskiej przygotowywane były na bazie różnych udziałów regeneratu czystego piasku jako osnowy. Użyte materiały pochodziły z bieżącego procesu produkcyjnego odlewni Rafamet.

Spoiwo

Materiały wiążące stosowane w odlewni Rafamet należą do grupy spoiw no-bake. Głównym składnikiem spoiwa jest żywica FURANIC 75 KR/1 jest to żywica mocznikowo-furfurylowo-formaldehydową w postaci cieczy o jasnobrązowej barwie. Do jej utwardzenia stosuje się utwardzacze na bazie kwasów sulfonowych. W warunkach letnich najczęściej aplikowanym utwardzaczem jest RG 121, natomiast w warunkach zimowych najczęściej stosowany jest utwardzacz RG 5, który odznacza się krótszym czasem utwardzania.

Pokrycie

W zrealizowanych badaniach użyte zostały trzy rodzaje pokryć ogniotrwałych, które najlepiej sprawdzają się w warunach przemysłowych odlewni Rafamet. Pierwsze z nich to pokrycie grafitowe wodne BLACKING ARP 77 SF (szare), drugie to wodne pokrycie BROWN COVER PSE 73 W (brązowe), są to pokrycia dedykowane do metody

pełnej formy, natomiast ostatnie pokrycie użyte w badaniach to pokrycie alkoholowe „Zirkofluid”, które jest standardowym pokryciem formierskim.

Badania masy formierskiej przeprowadzone zostały w dwóch etapach.

Wstępne badania przepuszczalności masy formierskiej

W pierwszym etapie badane próbki wykonano z piasków o różnej ziarnistości (Tabela 5.2.1.)

Tabela 5.2.1. Zestawienie zastosowanej ziarnistości osnowy w badaniach wstępnych przepuszczalności masy formierskiej

L.p.	Skład ziarnowy osnowy	
	Bez pokrycia	Z pokryciem
1	0,10/0,071/0,056	0,10/0,071/0,056
2	0,63/0,40/0,32	0,63/0,40/0,32
3	0,32/0,20/0,16	0,32/0,20/0,16

Zasadnicze badania przepuszczalności masy formierskiej

Na etapie zasadniczym badań osnowę stanowił piasek i regenerat stosowany w procesie produkcyjnym w odlewni Rafamet o ziarnistości 0,40/0,32/0,20. Próbki do badań wykonane zostały z masy o różnych udziałach świeżego piasku, regeneratu, żywicy FURANIC 75 KR/1 i utwardzacza RG 5 (Tabela 5.2.2.)

Tabela 5.2.2. Zestawienie udziałów osnowy i środków wiążących w badaniach zasadniczych przepuszczalności masy formierskiej

L.p.	Udział osnowy		Żywica/Utwardzacz
	Regenerat	Piasek	
1	100%	0%	1% : 0,5% [cz. wag.]
2	0%	100%	1% : 0,5% [cz. wag.]
3	50%	50%	1% : 0,5% [cz. wag.]
4	75%	25%	1% : 0,5% [cz. wag.]
5	90%	10%	1% : 0,5% [cz. wag.]
6	85%	15%	1% : 0,5% [cz. wag.]
7	95%	5%	1% : 0,5% [cz. wag.]
8	100%	0%	2% : 0,5% [cz. wag.]
9	50%	50%	2% : 0,5% [cz. wag.]
10	0%	100%	2% : 0,5% [cz. wag.]
11	90%	10%	2% : 0,5% [cz. wag.]

Materiały użyte w badaniach weryfikujących z wykorzystaniem zmodyfikowanej próby lejności Ruffa

Formy odlewnicze do przeprowadzenia próby Ruffa w ramach wytopów laboratoryjnych wykonane zostały z masy formierskiej o udziałach materiałów osnowy i proporcji dodatku środków wiążących zaprezentowanych w tabeli 5.2.3. Zarówno świeży piasek oraz regenerat charakteryzowały się ziarnistością 0,40/0,32/0,20. Użyte spoiwo to żywica FURANIC 75 KR/1, natomiast utwardzacz to RG 5. W celu uniknięcia wpływu na wyniki zmiennych właściwości stopu materiał, którym zalewano formy było żeliwo pochodzące z przetopu złomu żeliwa sferoidalnego. We wszystkich zrealizowanych wytopach użyty został złom pochodzący z jednego wytopu.

Tabela 5.2.3. Udziały osnowy i materiałów wiążących masy formierskiej

Forma	Regenerat	Świeży piasek	Żywica/Utwardzacz
1	0%	100%	1% : 0,5% [cz. wag.]
2	50%	50%	1% : 0,5% [cz. wag.]
3	0%	100%	1% : 0,5% [cz. wag.]
4	50%	50%	1% : 0,5% [cz. wag.]
5	50%	50%	1% : 0,5% [cz. wag.]
6	50%	50%	1% : 0,5% [cz. wag.]

Materiały wykorzystane w badaniach wpływu wartości proporcji pola powierzchni do objętośći modelu/ odlewu na proces wypełniania formy

Do wykonania form testowych w tym etapie badań użyto materiałów, które stosowane są w procesie produkcji w Odlewni Rafamet, szczegóły przedstawione zostały w tabeli 5.2.4. W ramach badań laboratoryjnych formy zalane zostały żeliwem z przetopu złomu żeliwa sferoidalnego z bieżącej produkcji Odlewni Rafamet. W ramach badań quasi-przemysłowych forma zalana została żeliwem szarym GJL 250.

Tabela 5.2.4. Zestawienie materiałów na formy i modele użytych w badaniach

Etap badań	Masa formierska	Materiał modelu
Laboratoryjne	Regenerat 50% - Świeży piasek 50% Żywica 1% - Utwardzacz 0,5% [cz.wag.]	EPS VFG18
Quasi-przemysłowe	Regenerat 80 % - Świeży piasek 20 % Żywica 1%- Utwardzacz 0,5% [cz.wag.]	EPS VFG18

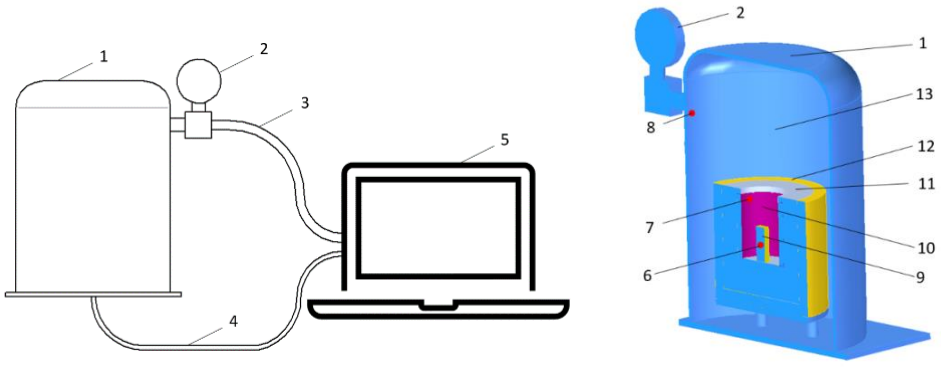
6. METODYKA BADAWCZA

6.1. STANOWISKO DO ZGAZOWANIE MATERIAŁÓW NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE

W celu określenia ilości produktów pirolizy opracowano i wykonano stanowisko umożliwiające w prosty i szybki sposób ilościową oceną procesu zgazowania materiału jednorazowego modelu.

Koncepcja stanowiska pomiarowego (rys. 6.1.1.) została opracowana w celu określenia możliwości realizacji badań procesu spalania modeli jednorazowych. W skład stanowiska wchodzą: szczelna komora (1), elementy grzewcze oporowe (7), czujniki: ciśnienia (2) oraz temperatury (6), (7) i (8), przewody kompensacyjne (3) i (4), przetwornik analogowo cyfrowy i komputer ze dedykowanym oprogramowaniem (5), badana próbka (9), glinokrzemianowe elementy ogniotrwałe i izolacyjne (11) i (12) oraz elementy konstrukcyjne. Temperatura całkowitego zgazowania polistyrenu to około 400°C [13], przewidywane jest spalanie próbki o objętości 5-10 cm^3, co powinno nastąpić w czasie około 60 s [96].

a) b)



Rys. 6.1.1. Koncepcja budowy stanowiska pomiarowego. a) schemat stanowiska badawczego; b) widok w przekroju komory spalania

Założono, że zastosowanie szczelnej zamkniętej komory pozwoli wykonać dokładne pomiary zmian ciśnienia w funkcji temperatury w komorze spalania,

a porównanie wyników cyklu nagrzewania pustej komory z nagrzewaniem i zgazowaniem próbki pozwoli na określenie ilości produktów spalania modelu polistyrenowego.

Wstępnie określona została geometria poszczególnych elementów stanowiska. Niezbędna moc elementu grzejnego oraz wymagany zakres pomiarowy czujnika ciśnienia został określony na podstawie wyników symulacji komputerowej działania urządzenia zgodnie z opracowaną koncepcją.

Na podstawie wstępnie określonej koncepcji stanowiska pomiarowego opracowane zostały założenia geometryczno-materiałowe poszczególnych elementów urządzenia oraz założone zostały odpowiednie warunki początkowe i brzegowe. W oparciu o założenia opracowany został model urządzenia w programie ANSYS-Fluent. Wykonany został cykl symulacji mający na celu weryfikację koncepcji pod kątem uzyskania odpowiednich warunków termicznych w komorze spalania oraz doboru czujnika ciśnienia o odpowiednim zakresie pomiarowym. W tym celu w modelu założono trzy punkty pomiaru temperatury zgodnie z założeniami koncepcyjnymi (rys. 6.1.1.). Zmianę ciśnienia powietrza spowodowaną wzrostem temperatury w komorze pomiarowej urządzenia obliczono na podstawie prawa Charles’a. Zgodnie, z którym ciśnienie gazu w stałej objętości zwiększa się o stały ułamek ciśnienia tego gazu zmierzonego w temperaturze 0°C przy wzroście temperatury o 1°C (1). W obliczeniach zastosowano średnią w danej chwili temperaturę powietrza w komorze.

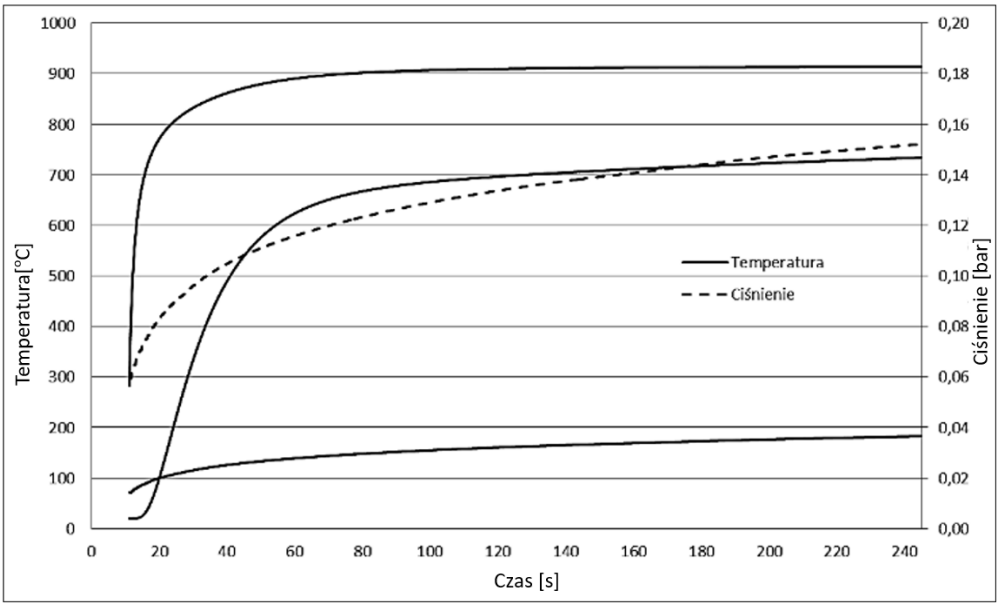
$$p = p_0 \left(1 + \frac{T}{273}\right) \tag{1}$$

gdzie:

T- temperatura [^{o}C],

p_0- ciśnienie gazu w temperaturze 0°C.

Przebieg zmian temperatury w punktach pomiarowych oraz uśrednionego ciśnienia powietrza w komorze pomiarowej przedstawiono na wykresie na rysunku 6.1.2.

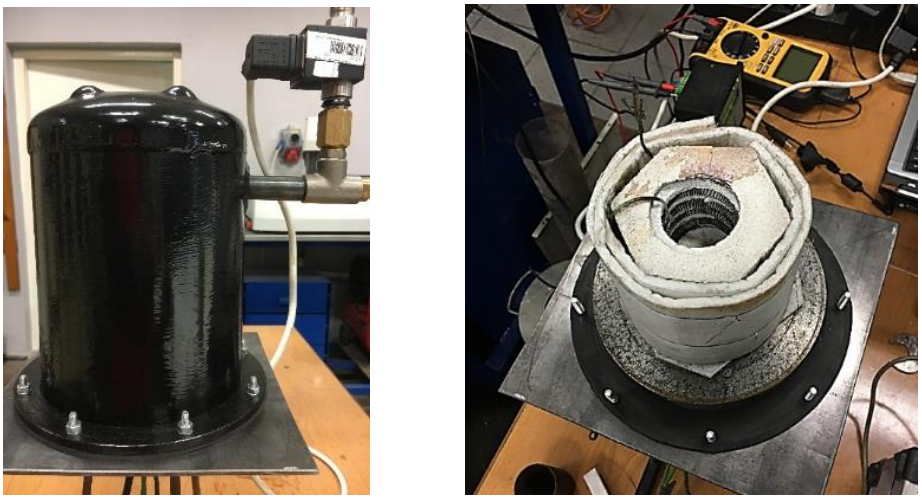


Rys. 6.1.2. Symulowane przebiegi temperatury i ciśnienia w komorze pomiarowej

Wyniki symulacji potwierdziły poprawność koncepcji i założeń geometryczno-materiałowych projektowanego stanowiska do określania ilości produktów zgazowania materiałów na modele w technologii pełnej formy. Wartość temperatury uzyskana w komorze spalania jest wystarczająca, z odpowiednim naddatkiem, do całkowitego zgazowania próbki modelu. Obliczona wartość ciśnienia pozwoliła określić zakres pomiarowy czujnika ciśnienia ostatecznie zdecydowano się na czujnik o zakresie 0-0,4 bara.

W oparciu o opracowaną koncepcję i wyniki weryfikacji założeń określona została końcowa wersja projektu stanowiska pomiarowego oraz wykonano jego prototyp. Zdjęcia prototypu komory pomiarowej przedstawione zostały na rysunku 6.1.3. Widok kompletnego prototypu stanowiska wraz z układem zasilania przetwornikami analogowo-cyfrowymi i komputerami do rejestracji pokazany został na rysunku 6.1.4.

a) b)

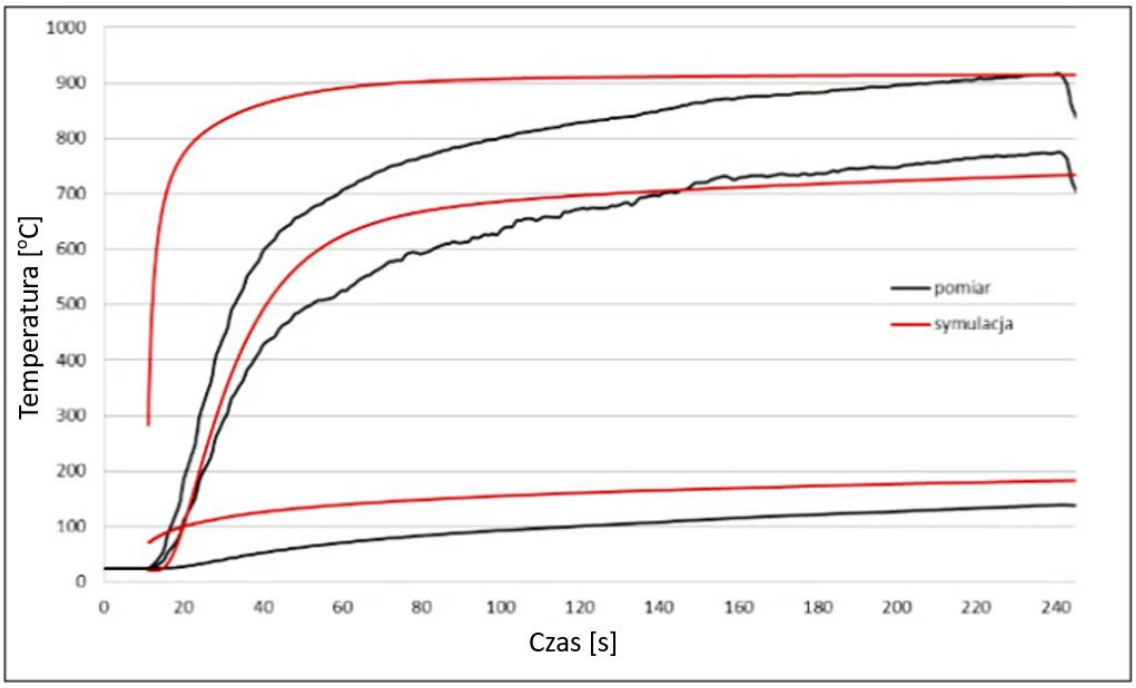


Rys. 6.1.3. Prototyp komory zaprojektowanego stanowiska pomiarowego

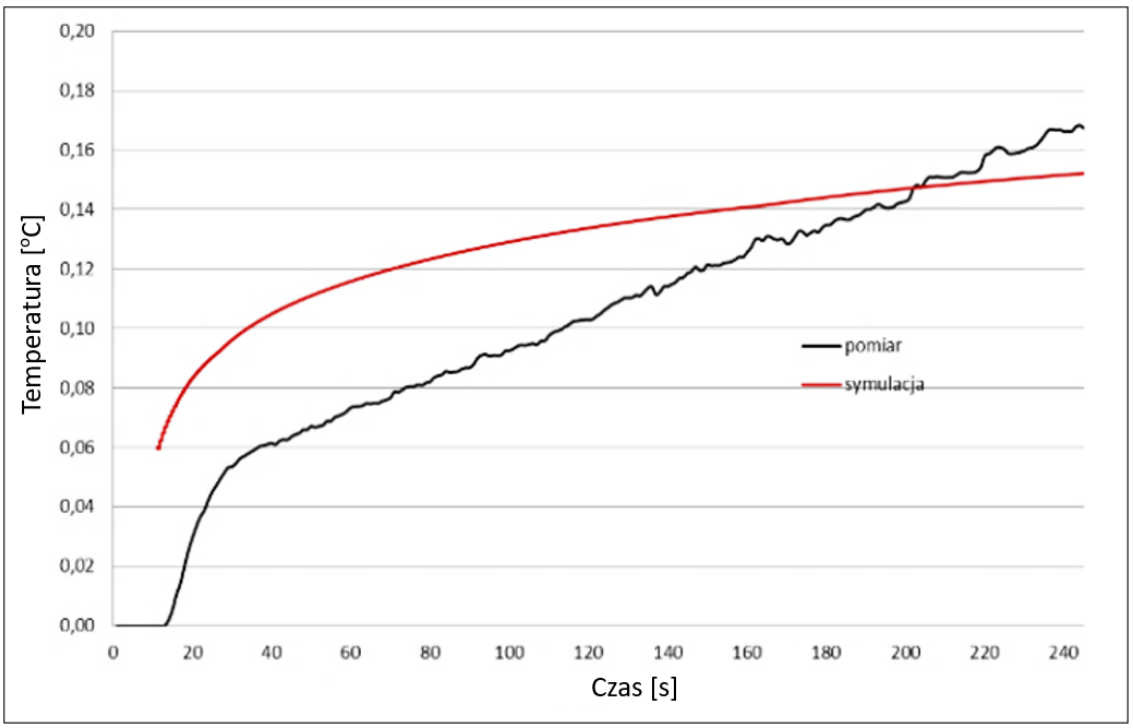
Rys. 6.1.4. Widok kompletnego stanowiska pomiarowo-badawczego w czasie wykonywania testów

Cykl prób testujących opierał się na kilkukrotnie powtarzanych pomiarach temperatury i ciśnienia podczas nagrzewania w komorze spalania. Proces nagrzewania został przeprowadzony zarówno w warunkach z próbką polistyrenową jak również bez. W każdym z wariantów zostały zapewnione te same warunki procesu.

Pierwszy etap pomiarów testujących polegał na przeprowadzeniu nagrzewania dla komory bez próbki. Na rysunku 6.1.5. i 6.1.6. przedstawiono zestawienie krzywych zmian odpowiednio temperatury i ciśnienia, symulowanych i pomiarowych dla pustej komory spalania.



Rys. 6.1.5. Krzywe zmian temperatury w komorze spalania, wyniki symulacji

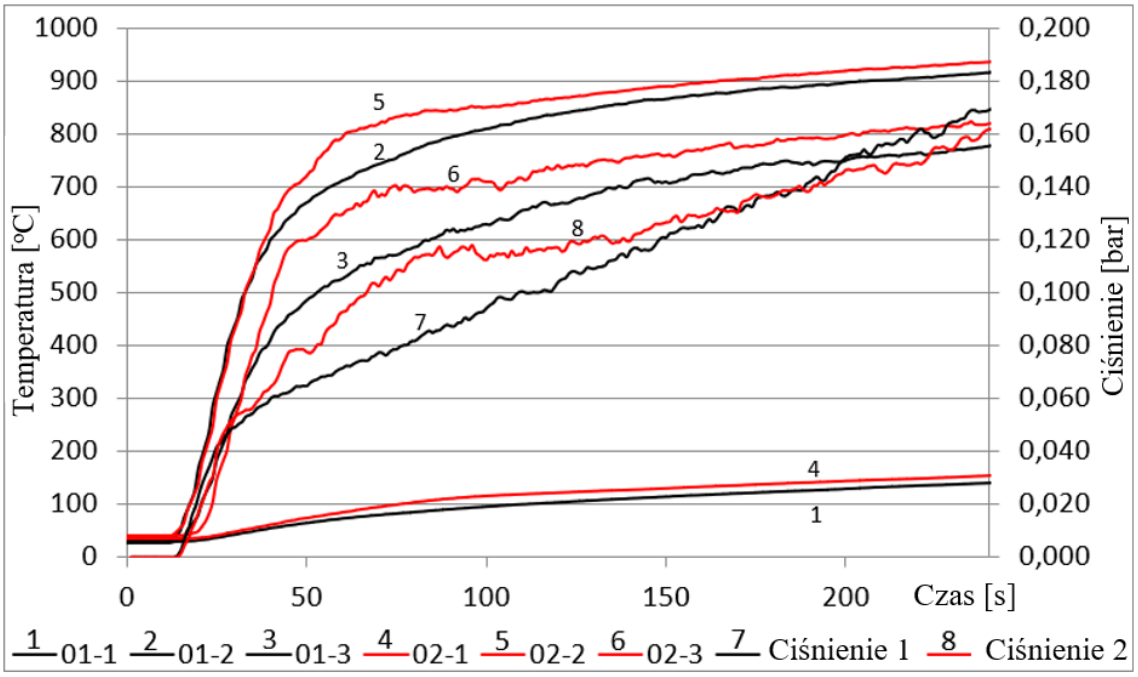


Rys. 6.1.6. Krzywe zmian ciśnienia w komorze spalania, wyniki symulacji

Pomiar ilości produktów zgazowania materiału na modele jednorazowe odbywał się w dwóch etapach. Pierwszym z nich było nagrzewanie pustej (bez próbki polistyrenu) komory pomiarowej w czasie 240 s co powodowało osiągnięcie temperatury około 900°C w punkcie pomiarowym 7 (rys. 6.1.7.). Po tym czasie zasilanie elementu grzejnego

zostawało odłączone i następowało stygnięcie zamkniętej komory trwające 10 min. Dalsze studzenie, do temperatury otoczenia, wszystkich elementów urządzenia odbywało się przy otwartej komorze pomiarowej. Po ostygnięciu w komorze umieszczano próbkę materiału do zgazowania i zamykano ją. Drugi etap pomiaru polegał na identycznym, jak w pierwszym etapie, prowadzeniu procesu nagrzewania i studzenia komory pomiarowej. Efektem takiego działania były wyniki pomiarów przeprowadzanych w możliwie zbliżonych warunkach dla cyklu nagrzewania i chłodzenia komory pomiarowej bez próbki oraz z próbką. Porównując wyniki obu cykli można precyzyjnie określić różnice w ich przebiegu i na tej podstawie precyzyjnie oszacować ilość produktów zgazowania badanej próbki.

Krzywe na wykresie przedstawiają zmiany wartości temperatury oraz ciśnienia w czasie nagrzewania komory bez i z próbką polistyrenową. Zestawienie funkcji ciśnienia i temperatury w czasie dla badanych próbek przedstawiono na rys. 6.1.7.



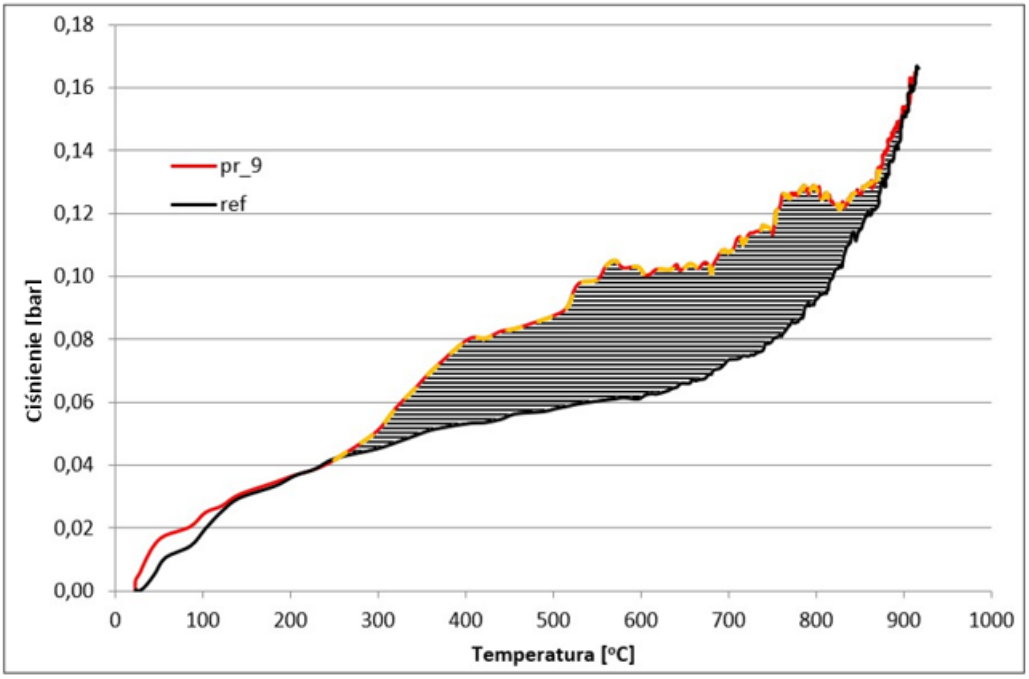
Rys. 6.1.7. Zestawienie wyników temperatury i ciśnienia w funkcji czasu. 4, 5, 6, 8 - proces nagrzewania wraz z próbką polistyrenową. 1, 2, 3, 7 - proces nagrzewania bez próbki polistyrenowej

Realizacja badań testujących polegała na zgazowaniu próbek polistyrenowych przeprowadzonych w cyklu 6 prób wstępnych, dane badanych próbek zostały zamieszczone w tabeli 6.1.1. W przypadku dwóch pomiarów próbki styropianu zostały dodatkowo sklejone. Do połączenia próbek użyto dwóch rodzajów kleju: uniwersalnego

polimerowego oraz dedykowanego do przemysłowego łączenia modeli z polistyrenu. Każda próbka posiadała ten sam wymiar 1,5 x 1,5 x 3,4 [cm] co dawało objętość 7,65 cm^3. Wynikiem wykonanego pomiaru jest pole powierzchni pomiędzy krzywią zmiany ciśnienia w funkcji temperatury dla nagrzewania pustej komory spalania nazywaną dalej referencyjną a krzywią zmiany ciśnienia w funkcji temperatury dla nagrzewania komory spalania z próbką. Przykładowy wykres z zaznaczonym polem powierzchni został zaprezentowany na rys. 6.1.8.

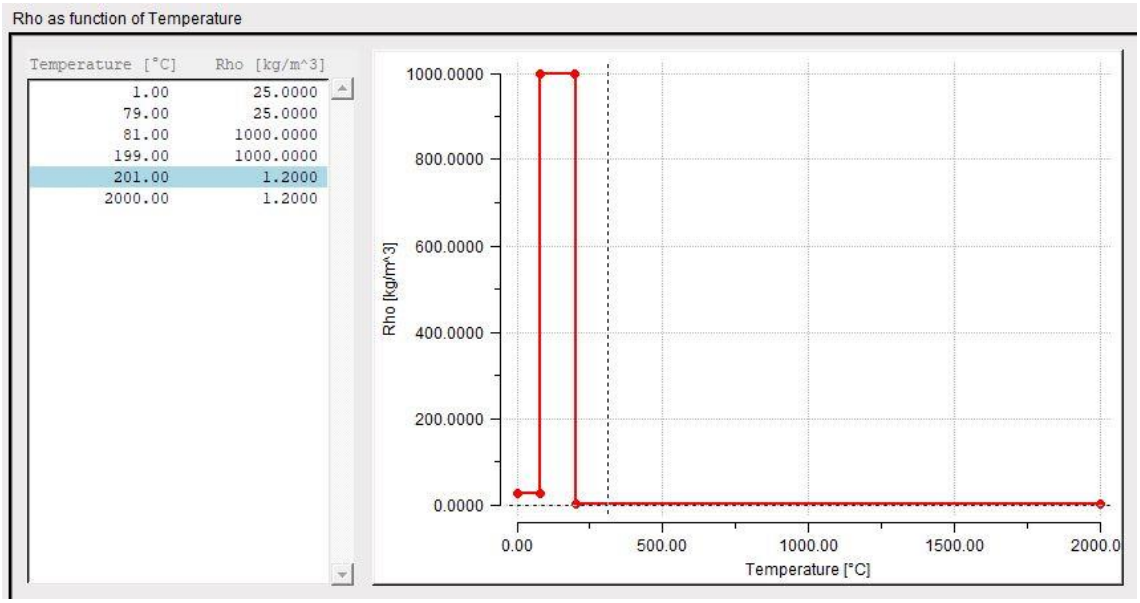
Tabela 6.1.1. Dane próbek polistyrenu w badaniach testowych stanowiska

L.p.	Oznaczenie	Materiał	Zastosowanie kleju	Masa próbki [g]	Masa końcowa [g]
1	PR_4	EPS 70	-	0,216	0,216
2	PR_5	EPS 70	-	0,204	0,204
3	PR_6	EPS 70	-	0,237	0,237
4	PR_7	EPS 70	-	0,199	0,199
5	PR_8	EPS 70	polimerowy	0.199	0.257
6	PR_9	EPS 70	dedykowany FM	0.205	0.327



Rys. 6.1.8. Przykładowy wykres zależności ciśnienia od temperatury - próba numer 9, pole powierzchni między krzywymi 13,50 [bar·K]

Implementacja otrzymanych wyników w programie MagmaSoft wymaga przeliczenia uzyskanych wartości ciśnienia na gęstość materiału modelu po zgazowaniu. Zmiana gęstości przykładowego materiału na modele jednorazowe z bazy danych termofizycznych MagmaSoft przedstawiona została na wykresie (rys. 6.1.9.).



Rys. 6.1.9. Zmiana gęstości w funkcji temperatury przykładowego materiału na modele jednorazowe z bazy danych termofizycznych MagmaSoft [97]

Zgodnie z wykresem z rysunku 6.1.9. gęstość materiału spienionego zmienia się skokowo i właściwie definiują ją trzy wartości dla trzech form w odpowiednich zakresach temperatury. Pierwsza wartość odpowiada gęstości materiału w postaci spienionej, druga w stanie ciekłym i trzecie to właściwie gęstość po zgazowaniu. Z punktu widzenia modelowania procesu wypełniania formy najistotniejsza jest ta trzecia bo od niej będzie zależała wartość ciśnienia w szczelinie gazowej między lustrem ciekłego metalu, a modelem w postaci spienionej. W celu wyznaczenia objętości produktów pirolizy próbki materiału zgazowanego w komorze pomiarowej skorzystano z prawa Boyle'a Mariotte'a zgodnie, z którym ciśnienie gazu jest odwrotnie proporcjonalne do jego objętości.

Zastępczą objętość gazu w komorze pomiarowej po pirolizie kompensującą wzrost ciśnienia spowodowaną pojawiającymi się produktami zgazowania próbki można obliczyć z zależności:

$$V_2 = (p_1 + \Delta p)\, V_1/p_1 \qquad (2)$$

gdzie:

V_1 – objętość komory pomiarowej, p_1 – ciśnienie w cyklu bez próbki, Δp – różnica ciśnienia pomiędzy cyklem bez i z próbką obliczona na podstawie pola powierzchni pomiędzy krzywymi zmian ciśnienia w obu cyklach pomiarowych, V_2 - objętość

zastępcza kompensująca wzrost ciśnienia spowodowaną pojawiającymi się produktami zgazowania próbki.

Na podstawie wartości różnicy objętości komory pomiarowej i obliczonej objętości zastępczej oraz masy próbki można obliczyć gęstość gazu będącego produktem pirolizy materiału próbki. W tabeli 6.1.2. zestawione zostały wartości wynikowe próby oraz obliczeń dla próbki PR_4.

Tabela 6.1.2. Przykładowe wyniki obliczeń gęstości produktów pirolizy

L.p.	Oznaczenie	Materiał	Masa próbki [g]	Δp [bar]	Przyrost objętości V_2-V_1 [cm^3]	Gęstość produktów pirolizy [kg/m^3]
1	PR_4	EPS 70	0,216	0,017259	91,47325	2,3613

6.2. BADANIA PRZEPUSZCZALNOŚCI MASY FORMIERSKIEJ

Przeprowadzone badania przepuszczalności masy formierskiej pozwoliły określić wartości tego parametru dla różnych konfiguracji osnowy i materiałów wiążących. W celu implementacji wyników pomiarów przepuszczalności do środowiska symulacyjnego programu MagmaSoft konieczne jest odpowiednie przeliczenie uzyskanych wartości przepuszczalności na objętościowe natężenie przepływu zgodnie z zależnością (3).

$$P = \frac{V \cdot h}{F \cdot \tau \cdot p} \left[\frac{m^2}{Pa \cdot s} \cdot 10^{-8}\right] \tag{3}$$

gdzie:

P – przepuszczalność,

V – objętość powietrza przepływającego przez kształtkę [m^3],

H – wysokość kształtki [m],

τ – czas przepływu objętości V powietrza przez kształtkę [s],

p – nadciśnienie powietrza [Pa].

Objętościowe natężenie przepływu powietrza wyrażane jest wzorem [97]:

$$\dot{V} = G_d \frac{A}{h} \delta_p \tag{4}$$

gdzie:

$\dot{V}$ – objętościowe natężenie przepływu [cm^3/min],

G_d – współczynnik przepuszczalności gazu [cm^2/mbar/min],

A – obszar kontaktu między materiałem, a powietrzem [cm^2],

h – wysokość formy [cm],

δp – różnice ciśnień między zewnętrzną i wewnętrzną stroną formy [mbar].

Współczynnik przepuszczalności gazu obliczany jest ze wzoru [97]:

$$G_d = \frac{V \cdot h}{A \cdot \delta_p \cdot t} \tag{5}$$

gdzie:

t - zmierzony czas [min],

Wartości przyjęte do obliczeń:

h = 5 [cm]

V = 2000 [cm^3]

A = ($\pi \cdot 5^2$)/4 [cm^2]

δp = 9,81 [mbar]

Badania laboratoryjne przepuszczalności masy formierskiej zostały wykonane według normy PN-80/H-11072. Zagęszczone kształtki walcowe o znormalizowanych wymiarach ø50x50 mm, przedstawione na rys. 6.2.1. zostały wykonane z masy formierskiej o zróżnicowanych udziałach piasku kwarcowego i regeneratu w osnowie oraz zróżnicowanym dodatku materiałów wiążących szczegółowe zestawienie przedstawione zostało w tabeli 5.2.2. w rozdziale Materiały. Dla każdej konfiguracji materiału osnowy i materiałów wiążących wykonano po trzy jednakowe próbki. Badania przepuszczalności przeprowadzone zostały na maszynie typu LPiR-3e firmy Multiserw przedstawionej na rys. 6.2.2. Badania wykonano metodą dla mas bezwodnych, przy użyciu dedykowanej tulei, posiadającej wewnętrzną gumową uszczelkę dociskaną do pobocznicy kształtki sprężonym powietrzem.

Rys. 6.2.1. Próbki walcowe do badań przepuszczalności masy formierskiej bez pokrycia ogniotrwałego

Rys. 6.2.2. Maszyna do badań przepuszczalności masy formierskiej typu LPiR-3e wraz ze specjalną tulejką do mas bezwodnych

Po wykonaniu badań przepuszczalności, na próbki zostało naniesione wodne pokrycie ochronne dedykowane do technologii pełnej formy. Nanoszenie pokrycia odbywało się poprzez zanurzenie górnej powierzchni próbki przez czas 5 sekund, a następnie próbki odstawiano do wysuszenia w warunkach pokojowych. Po wysuszeniu przeprowadzono ponowne badania przepuszczalności. Próbki wraz z pokryciem ogniotrwałym przedstawiono na rys. 6.2.3. Próbki nie posiadające pokrycia badano z użyciem dyszy o średnicy 1,5 mm, natomiast w przypadku próbek z naniesionym pokryciem oznaczenie przepuszczalności wymagało użycia dyszy o średnicy 0,5 mm.

Rys. 6.2.3. Próbki do badań przepuszczalności masy formierskiej z naniesionym pokryciem

6.3. BADANIA SYMULACYJNE PRZEPUSZCZALNOŚCI MASY FORMIERSKIEJ

Celem badań było określenie cech geometrycznych i fizycznych masy formierskiej, które mają decydujący wpływ na wartość przepuszczalności wirtualnej formy.

Badania polegały na komputerowym zamodelowaniu pomiaru przepuszczalności na aparacie LPiR-3e dla próbki z masy formierskiej, która została wykonana na osnowie piasku o określonej ziarnistości, związanej żywicą organiczną. Wykonana analiza sitowa dla próbki świeżego piasku i masy regenerowanej oraz uzyskane obliczenia pozwoliły określić teoretyczną porowatość masy formierskiej oraz parametry przepuszczalności. Wyniki przepuszczalności dla określonej porowatości uzyskane dla wirtualnego pomiaru zostały zestawione z wynikami rzeczywistymi, w celach weryfikacji i walidacji modelu na podstawie analizy porównawczej z wynikami rzeczywistych pomiarów.

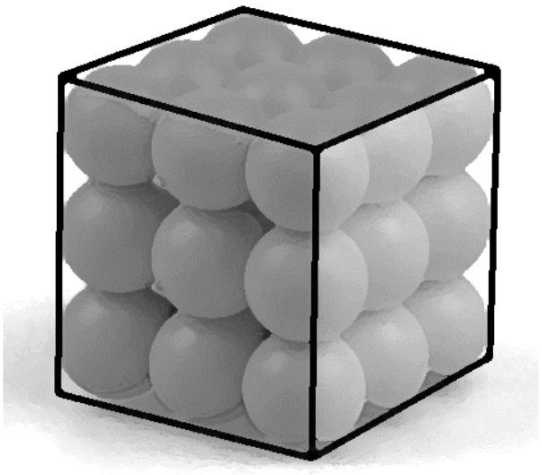
W pierwszej kolejności wykonano dwa pomiary analizy sitowej próbek (50g) świeżego piasku i regeneratu, które stanowiły podłoże obliczenia średnicy zastępczej, potrzebnej do symulacji.

W badaniach wstępnych przeprowadzono komputerową symulację badania laboratoryjnego przepuszczalności masy formierskiej dla wyznaczonej średnicy zastępczej. Zestawienie udziałów materiałów osnowy użytych w badaniach przedstawiono w tab. 6.3.1.

Tabela 6.3.1 Zestawienie udziałów materiałów osnowy użytej w badaniach masy formierskiej

L.p.	Udział materiałów osnowy [%]		Średnica zastępcza [mm]
	Regenerat	Świeży piasek	
1	100	0	0,309724096≈0,31
2	0	100	0,289672282≈0,29
3	50	50	0,299698189≈0,30

Jednym z kluczowych zagadnień wpływających na przepuszczalność masy formierskiej jest przepływ gazów przez pory występujące w formie odlewniczej. Wpływ na to ma przede wszystkim wielkość ziarna osnowy masy formierskiej i zastosowanie pokrycia. W związku z tym w przeprowadzono badania laboratoryjne przepuszczalności masy formierskiej dla 3 ziarnistości osnowy masy formierskiej bez oraz z uwzględnieniem pokrycia. W celu wstępnego wyznaczenia porowatości na potrzeby modelowania komputerowego, przyjęto figurę sześcienną utworzoną z 27 ziaren piasku. Dla celów badawczych przyjęto identyczny rozmiar ziarna w postaci sfery, co przedstawiono na rys. 6.3.1.



Rys. 6.3.1. Sześcian składający się z 27 modelowych „ziaren” osnowy

Obliczenie porowatości dla sześcianu polegało na wyznaczeniu różnicy między objętością sześcianu, a objętością wszystkich „ziaren” o średnicy zastępczej obliczonej na podstawie wyników analizy sitowej. Po wykonanych obliczeniach średnicy zastępczej i porowatości próbki świeżego piasku i regeneratu możliwe było przeprowadzenie obliczeń przepuszczalności modelowych mas formierskich. Wyniki stanowią podstawę do analizy porównawczej komputerowej symulacji badania przepuszczalności

w środowisku oprogramowania ANSYS Fluent z rzeczywistymi wartościami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych.

W programie symulacyjnym ciśnienie wstępne na wlocie zostało określone na 981 [Pa]. Wartość ta odpowiada stałej dla badania przeprowadzonego na aparacie LPiR-3e. W celu uzyskania identycznego wirtualnego badania w porównaniu do rzeczywistego konieczne jest wprowadzenie tego ciśnienia do parametrów (Initial Gauage Pressure).

Kolejnym krokiem symulacji było określenie oporu lepkiego $\frac{1}{\alpha}$ w każdym kierunku.

Gdzie α – to udział pustek na powierzchni płaskiej, dodatkowo oprócz wyznaczenia samej α należy ją również podzielić przez wysokość próbki w celu uzyskania współczynnika przepuszczalności.

Następnie wykorzystano równania Erguna do wyznaczenia wkładów mediów porowatych dla złoża z wypełnieniem.

W kontekście przepływów turbulentnych, złoża są modelowane przy użyciu zarówno współczynnika przepuszczalności jak i współczynnika strat inercyjnych. Jedną z możliwości wyznaczania odpowiednich stałych jest wykorzystanie równania Erguna, półempirycznej zależności stosowanej w szerokim zakresie liczby Reynoldsa i dla wielu rodzajów upakowania[23]:

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2}\frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} v_\infty + \frac{1.75\rho}{D_p}\frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} v_\infty^2 \tag{6}$$

Modelując przepływ laminarny przez złoże upakowane można zrezygnować z drugiego członu powyższego równania, otrzymując równanie Blake'a-Kozeny'ego:

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2}\frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} v_\infty \tag{7}$$

W tych równaniach μ oznacza lepkość, natomiast Dp oznacza średnią średnicę cząstek, L jest głębokością złoża, a ϵ jest frakcją pustek, zdefiniowaną jako objętość pustek podzieloną przez objętość obszaru upakowanego złoża. Współczynnik przepuszczalności i strat inercyjnych w każdym kierunku składowym można wyznaczyć jako:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150}\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \tag{8}$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p}\frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \tag{9}$$

Kolejno wyznaczono dane wejściowe dla mediów porowatych na podstawie prędkości powierzchniowej, przy znanej utracie ciśnienia. Podczas używania modelu ośrodka porowatego, należy pamiętać o tym, że komórki porowate w Ansys Flunet są w 100% otwarte i wartości które określamy $\frac{1}{a_{ij}}$ i/lub $C2ij$ muszą być oparte na tym założeniu. Rozważmy płytę perforowaną, która ma 25% powierzchni otwartej dla przepływu. Wiadomo, że spadek ciśnienia przez płytę jest 0,5 razy większy od powierzchni czołowej w rozpatrywanej płycie. Współczynnik strat, KL zdefiniowany jako:

$$\Delta p = K_{L'}(\frac{1}{2}pv_{25\%open}^2) \tag{10}$$

Który wynosi zatem 0,5, w oparciu o rzeczywistą prędkość płynu w płycie, tj. prędkości przez 25% powierzchni otwartej. W celu obliczenia odpowiedniej wartości dla C2, należy zauważyć, że w modelu ANSYS FLUENT:

1. Prędkość przez płytę perforowaną zakłada, że płyta jest w 100% otwarta.
2. Współczynnik strat należy przeliczyć na dynamiczne straty powierzchnię czołową na jednostkę długości obszaru porowatego.

Biorąc pod uwagę punkt 1, należy obliczyć skorygowany współczynnik strat KL', który opierałby się na prędkości 100% otwartego obszaru:

$$\Delta p = K_{L'}(\frac{1}{2}pv_{100\%open}^2) \tag{11}$$

Można zauważyć, że dla tego samego natężenia przepływu $v_{25\%open} = 4 \cdot v_{100\%open}$:

$$K_L' = K_L \cdot \frac{v_{25\%open}^2}{v_{100\%open}^2} \tag{12}$$

$$= 0.5 \cdot \left(\frac{4}{1}\right)^2 \tag{13}$$

$$= 8 \tag{14}$$

Skorygowany współczynnik strat ma wartość 8. Zauważając punkt 2, należy teraz przeliczyć go na współczynnik strat na jednostkę grubości próbki. Przyjmując, że próbka ma grubość 1.0 mm współczynnik strat bezwładnościowych wynosiłby wtedy:

$$C_2 = \frac{K_{L'}}{thickness} = \frac{8}{10^{-3}} = 8000m^{-1} \tag{15}$$

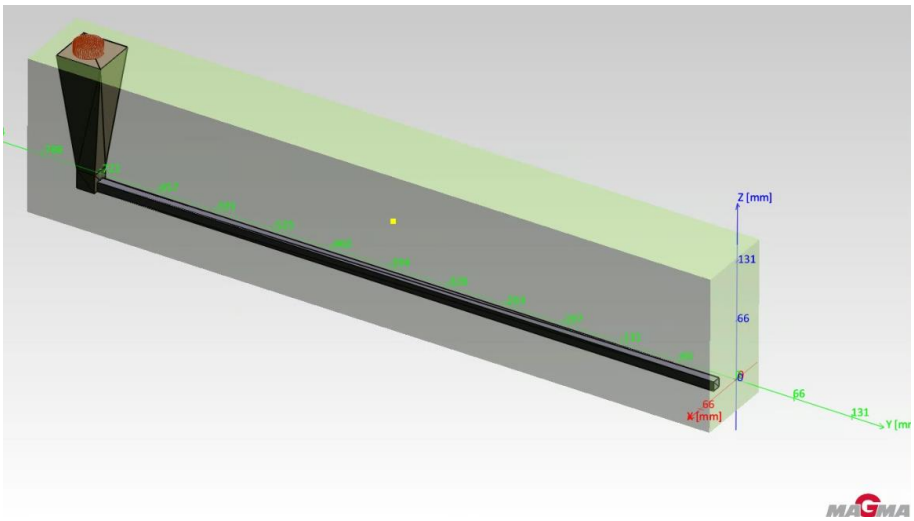
Należy pamiętać, że dla ośrodków anizotropowych informacja ta musi zostać obliczona dla każdego z 2 (lub 3) kierunków współrzędnych współczynnika oporu wewnętrznego C2 we wszystkich kierunkach, w polu Internal Resistance. W oparciu o powyższe założenia wyznaczono współczynnik oporu wewnętrznego we wszystkich kierunkach w polu Internal Resistance dla 100%, 50% i 25% powierzchni otwartej.

6.4. PRÓBA LEJNOŚCI RUFFA

6.4.1. BADANIA SYMULACYJNE

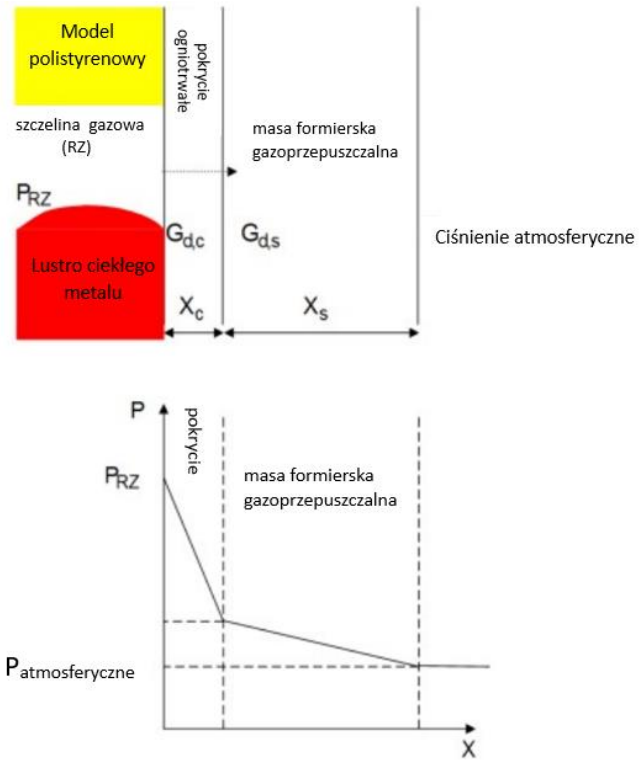
Próba lejności Ruffa, daje możliwość określenia wpływu na proces wypełniania wnęki formy podstawowych parametrów: metalu, masy formierskiej i pokrycia, a w przypadku metody FM także materiału jednorazowego modelu. Do wspomnianych czynników można także zaliczyć: konstrukcję układu wlewowego i wnęki formy, rodzaj i własności termofizyczne materiału formy, jakość powierzchni formy, temperaturę jak również ciśnienie metalostatyczne. Również istotne i możliwe do analizy w próbie lejności Ruffa są czynniki związane z warunkami odlewania czyli temperatura i stopień przegrzania metalu, szybkość i czas zalewania formy oraz ciśnienie atmosferyczne nad formą [98].

Widok geometrii próby Ruffa zdefiniowany w programie MagmaSoft w technologii Lost Foam przedstawiony został na rys. 6.4.1.1.



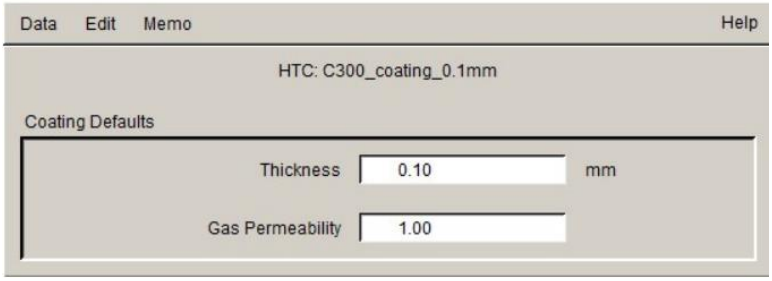
Rys. 6.4.1.1. Forma wraz z modelem próby Ruffa w środowisku programu MagmaSoft

W metodzie pełnej formy produkty pirolizy modelu polistyrenowego transportowane są z wnęki formy poprzez pokrycie ogniotrwałe i masę formierską gazoprzepuszczalną na zewnątrz formy odlewniczej. Znaczenie tutaj przede wszystkim ma ilość produktów gazowych, grubość pokrycia ogniotrwałego i masy formierskiej. Hipotetyczny spadek ciśnienia, w zależności od odległości od szczeliny gazowej, wewnątrz formy odlewniczej schematycznie przedstawiono na rys. 6.4.1.2.



Rys. 6.4.1.2. Schemat pirolizy modelu polistyrenowego i spadek ciśnienia w zależność od odległości szczeliny gazowej [97]

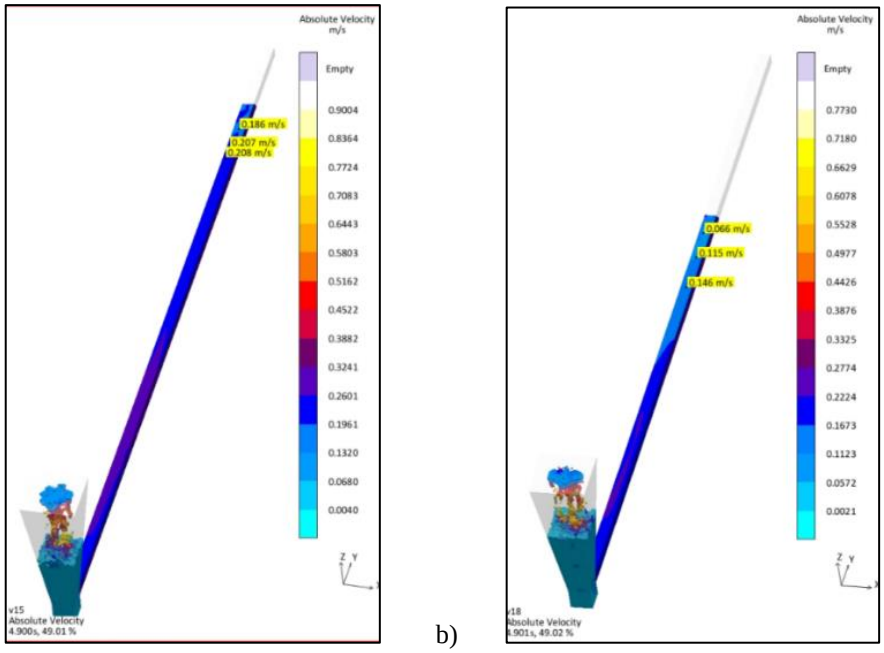
Program symulacyjny w MagmaSoft niestety nie daje dużej możliwości jeśli chodzi o implementację rzeczywistych danych laboratoryjnych w procesie Full Mold / Lost Foam. Przykładem mogą być dane odnośnie pokrycia ogniotrwałego, które w module Lost Foam są w bardzo małym stopniu możliwe do zmiany. Jedynie takie dane jak grubość pokrycia i przepuszczalność gazowa są danymi edytowalnymi. Dodatkowo przepuszczalność gazów jest wartością bez jednostkową, co może prowadzić do wielu wątpliwości. Przykładowy widok z zmiany danych symulacyjnych pokrycia ogniotrwałego w module Lost Foam widoczne jest na rys. 6.4.1.3.



Rys. 6.4.1.3. Okno zmiany danych pokrycia ogniotrwałego w programie symulacyjnym MagmaSoft [97]

Pokrycie ogniotrwałe wpływa znacząco na obniżenie przepuszczalności formy zatem należy się spodziewać również znaczącego wpływu na proces wypełniania wnęki formy w metodzie pełnej formy. Modele, które posiadają warstwę pokrycia będą wykazywać dłuższe czasy wypełniania, ze względu na trudniejszą ewakuację gazów przez warstwę pokrycia, w porównaniu do modeli pozbawionych pokrycia przy założeniu tej samej technologii formy. Przykładowy wynik symulacji takiego przypadku przedstawiony jest na rys. 6.1.4.4.

a) b)



Rys. 6.4.1.4. Różnice w wypełnianiu wnęki formy modelu
a) bez pokrycia, b) z pokryciem dla zastosowanej identycznej formy

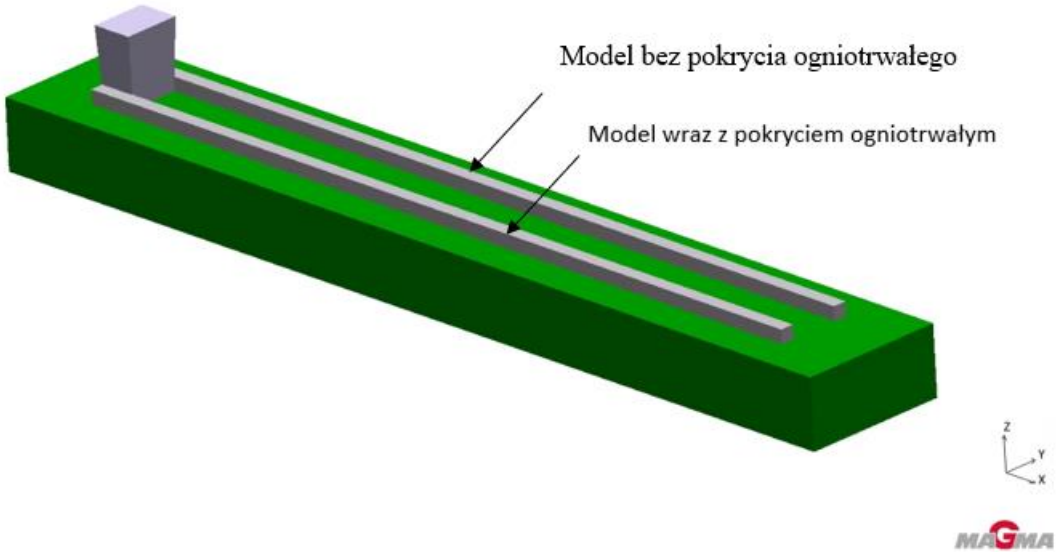
Implementacja wyników przeprowadzonych badań przepuszczalności odpowiednio przeliczonych polegała na wprowadzeniu uzyskanych danych do bazy programu symulacyjnego MagmaSoft. Następnie przeprowadzona została seria symulacji procesu zalewania dla modelu próby lejności Ruffa w technologii Full Mold z zastosowaniem zaimplementowanych danych.

6.4.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej wyników symulacji i prób rzeczywistych wykonana została seria testowych wytopów. W ramach każdego wytopu wykonana została zmodyfikowana próba lejności Ruffa. Równolegle przeprowadzone zostały badania symulacyjne polegające na komputerowym modelowaniu wypełniania wnęki formy próby Ruffa dla zaimplementowanych w programie symulacyjnym danych uzyskanych w badaniach przepuszczalności i procesu zgazowania modelu..

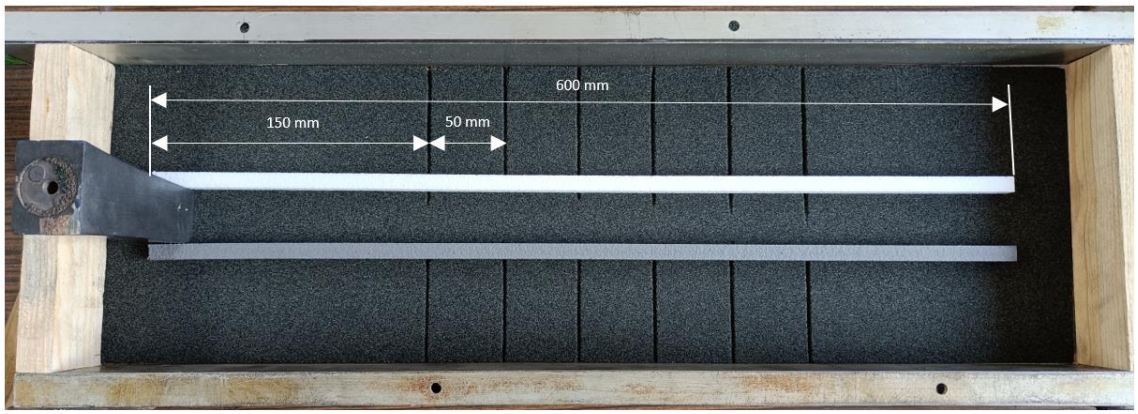
Model, widoczny na rys. 6.4.2.1., użyty w symulacjach jak i rzeczywistych wytopach został zmodyfikowany na potrzeby realizacji badań. W formie znajdowały się dwa wlewki o długości 600 mm i przekroju 10 x 10 [mm]. W każdej iteracji jeden model miał naniesione pokrycie grafitowe wodne, natomiast drugi model nie był pokrywany.

Założenia symulacji odnośnie parametrów technologicznych formy zostały zdefiniowane zgodnie z uzyskanymi danymi badań zasadniczych przepuszczalności masy formierskiej. Dodatkowo w formie umieszczono termopary, przy pomocy których określane były czasy dotarcia ciekłego metalu do danego punktu pomiarowego. Zastosowana konfiguracja zwiększyła klarowność otrzymanych wyników, uwzględniając różnice w czasie zalewnia.



Rys. 6.4.2.1. Geometria modelu zmodyfikowanej próby Ruffa użytej w symulacjach dla prób zasadniczych

Badania rzeczywiste zostały przeprowadzone w serii sześciu wytopów, w ramach których wykonano zmodyfikowanej próby Ruffa. W każdej formie zastosowano jednakowo rozmieszczone termopary, a formy wykonane zostały z masy o różnym udziale materiałów osnowy zgodnie z tabelą 5.2.3. zamieszczoną w rozdziale Materiały. Ponadto w wytopach zastosowano różną temperaturę zalewania dla każdej formy. Materiałem z którego zalewano formy było żeliwo z przetopu złomu żeliwa sferoidalnego. Umiejscowienie termopar w formie, widoczne na rys. 6.4.2.2., zostało dobrane doświadczalnie, a ich odległość od wlewu głównego wynosiła kolejno 150, 200, 250, 300, 350, 400 mm. Widok części formy, z modelami polistyrenowymi i rowkami pod termopary, przed procesem formowania przedstawiono na rys. 6.4.2.2.



Rys. 6.4.2.2. Część formy z modelami polistyrenowymi i widocznymi rowkami pod termopary

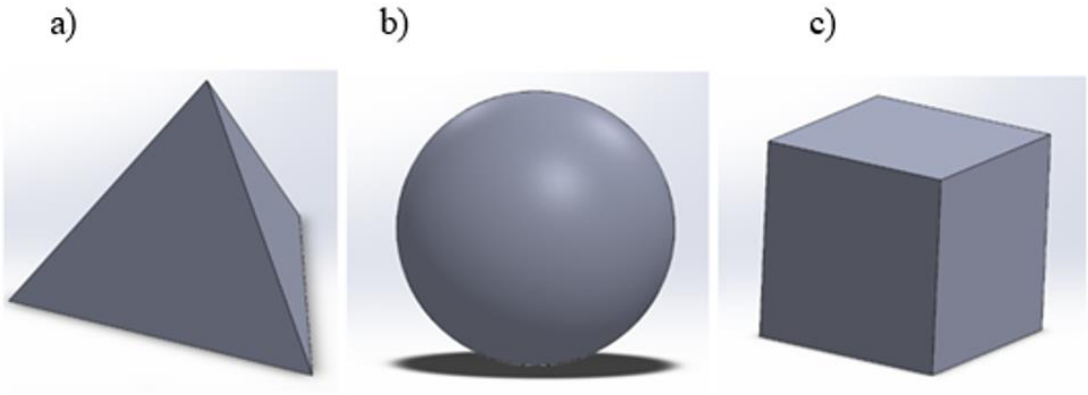
6.5. WPŁYW ZALEŻNOŚCI POLA POWIERZCHNI DO OBJĘTOŚCI MODELU NA PROCES WYPEŁNIANIA FORMY

Objętość modelu polistyrenowego jest ściśle związana z wielkością wytworzonych gazów w trakcie termicznej degradacji modelu. Wycinek z pola powierzchni zewnętrznej modelu polistyrenowego podczas zgazowania pełni rolę powierzchni, przez którą mogą zostać ewakuowane gazy podczas tego procesu. Geometria modelu polistyrenowego ma również znaczenie w kontekście zmian ciśnienia w tworzącej się w trakcie zalewania przestrzeni pomiędzy lustrem ciekłego metalu, a modelem polistyrenowym. Stosunek tych dwóch parametrów stanowi zatem kluczowe zagadnienie w ujęciu ilościowym transportu gazów z wnęki formy w metodzie pełnej formy. Celem badań było opracowanie modeli geometrycznych uwzględniających znacząco różne zależności pola powierzchni i objętości modelu, dzięki którym możliwe jest określenie wpływu stosunku tych parametrów na proces wypełnienia formy w warunkach symulacyjnych i rzeczywistych.

W ramach badań przeprowadzono symulacje komputerowe w programie MagmaSoft oraz wykonano analogiczne odlewy próbne w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych.

Do badań wpływu pola powierzchni do objętości odlewu opracowano mniejsze modele, które nazwano laboratoryjnymi (rys.6.5.1.), odzwierciadlające takie podstawowe bryły geometryczne jak: czworościan foremny, kulę oraz sześcian. Zostały one zaprojektowane w programie SolidEdge tak, aby przy jednakowej objętości i masie posiadały różną geometrię oraz pole powierzchni, co zostało ujęte w tabeli 6.5.1. Widok

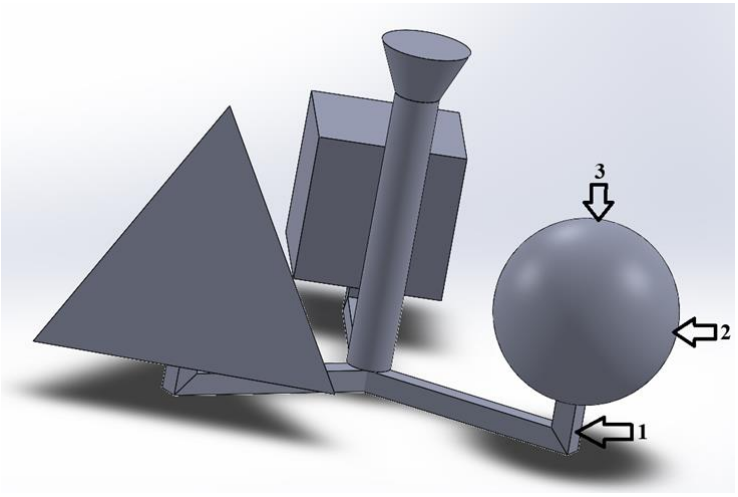
modeli wraz układem wlewowym i wskazaniem umiejscowienia termopar zaprezentowano na rys. 6.5.2.



Rys. 6.5.1. Modele laboratoryjne użyte w badaniach, a) czworościan foremny, b) kula, c) sześcian

Tabela 6.5.1.Własności modeli laboratoryjnych użytych w badaniach

Własności modeli	Kula	Sześcian	Czworościan foremny
Masa [kg]	7,3	7,3	7,3
Objętość [m^3]	0,001	0,001	0,001
Pole powierzchni [m^2]	0,048	0,060	0,072
Stosunek pole powierzchni / objętość	48	60	72



Punkty umiejscowienia termoelementów pomiarowych w każdym modelu:

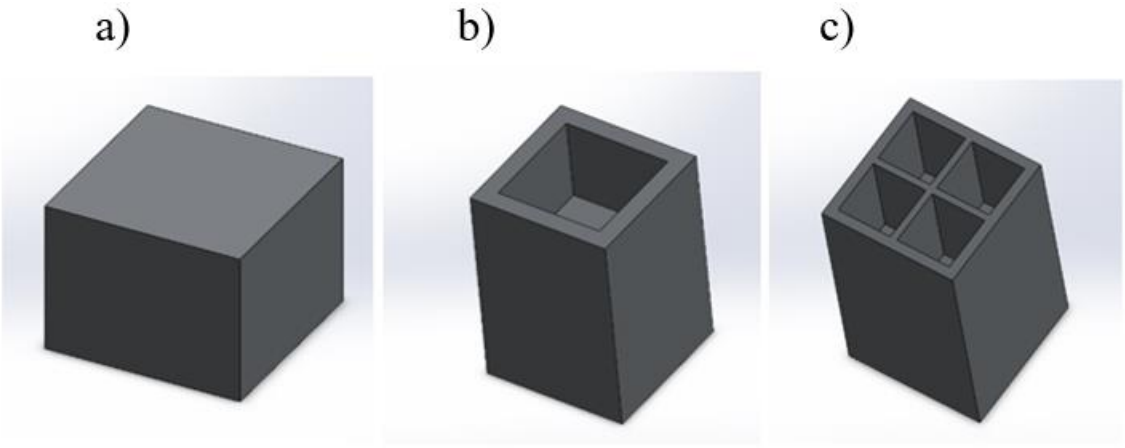
1 – wlew doprowadzający, 15 mm poniżej modelu docelowego

2 – połowa wysokości bryły

3 – wierzchołek modelu

Rys. 6.5.2.Model laboratoryjny wraz z układem wlewowym i umiejscowieniem termopar pomiarowych

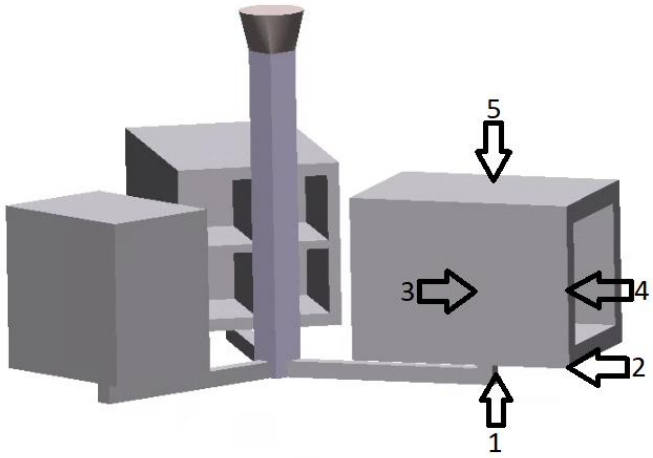
W toku badań opracowano również modele, których geometria była wzorowana na cechach geometrycznych odlewów produkowanych w technologii pełnej formy w odlewni Rafamet (rys.6.5.3.), na potrzeby niniejszej pracy nazwano je quasi-przemysłowymi. Również w tym wypadku zachowano zasadę doboru modeli o jednakowej objętości i masy przy różnym polu powierzchni i geometrii. Cechy zastosowanych modeli przedstawiono w tabeli 6.5.2., natomiast układ wlewowy zastosowany w modelach wraz z umiejscowieniem termopar przedstawiono na rys. 6.5.4.



Rys. 6.5.3.Modele quasi-przemysłowe użyte w badaniach

Tabela .6.5.2. Cechy modeli quasi-przemysłowych użytych w badaniach

Własności modelu	Model 1 (a)	Model 2 (b)	Model 3 (c)
Masa [kg]	43,8	43,8	43,8
Objętość [m^3]	0,006	0,006	0,006
Pole powierzchni [m^2]	0,200	0,440	0,698
Stosunek pole powierzchni / objętość	33,33	73,33	116,33



Rys. 6.5.4. Model quasi-przemysłowy wraz z układem wlewowym i umiejscowieniem termopar pomiarowych

Przeprowadzony został szereg symulacji dla różnych wartości parametrów technologicznych przy zachowaniu identycznego modelu geometrycznego dla każdej iteracji. Tabela 6.5.3. przedstawia założenia dla 5 wersji symulacji komputerowych dla modeli laboratoryjnych oraz dla 6 wersji większych modeli quasi-przemysłowych.

Uzyskane wyniki obliczeń i pomiarów stanowić będą podstawę weryfikacji zastosowanych danych oraz walidacji symulacji.

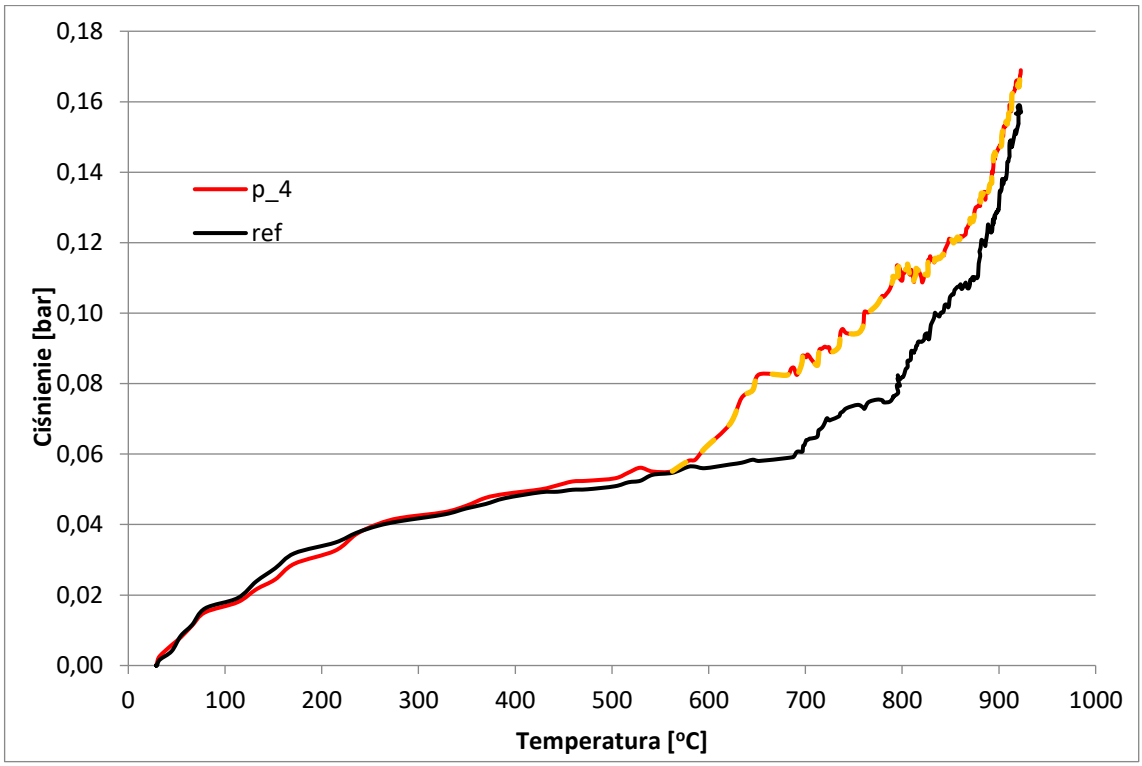
Tabela 6.5.3. Parametry symulacji komputerowych; laboratoryjnych i quasi-przemysłowych

Symulacje laboratoryjne						
Parametry symulacji	Wersja 1	Wersja 2	Wersja 3	Wersja 4	Wersja 5	Wersja 6
Uwzględnienie przepuszczalności masy formierskiej	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	-
Zastosowanie pokrycia	Nie	Nie	Tak	Nie	Tak	-
Wartość przepuszczalności masy formierskiej [cm^3/min]	-	100	100	10	10	-
Grubość pokrycia [mm]	-	-	1	-	1	-
Przepuszczalność pokrycia	-	-	0.1	-	0.1	-
Symulacje quasi-przemysłowe						
Uwzględnienie przepuszczalności masy formierskiej	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Zastosowanie pokrycia	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Wartość przepuszczalności masy formierskiej [cm^3/min]	-	100	100	500	10	100
Grubość pokrycia [mm]	-	1	1	1	1	2
Przepuszczalność pokrycia	-	1	100	1	1	0,1

7. WYNIKI

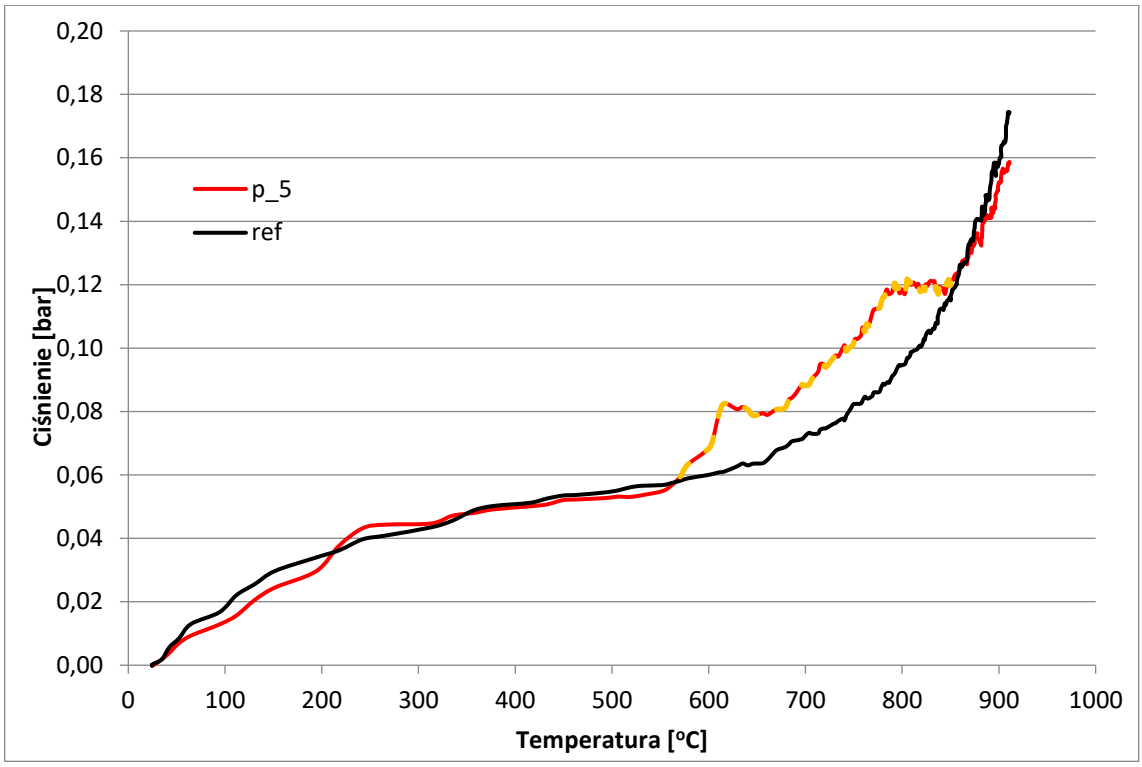
7.1. WYNIKI BADAŃ MATERIAŁÓW NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE. WYNIKI BADAŃ TESTOWYCH.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań, zestawione zostały na wykresach przedstawionych na rysunkach 7.1.1. – 7.1.6. Na wykresach przedstawiono porównanie przebiegów krzywych zmian ciśnienia podczas nagrzewania w komorze pustej i z próbką w funkcji temperatury. Różnice w przebiegu tych krzywych są wynikiem pojawienia się w komorze pomiarowej produktów zgazowania próbki materiału na jednorazowe modele. Zatem założyć można, że pole powierzchni pomiędzy tymi krzywymi odpowiada ilości gazów będących produktem pirolizy próbki, którą można będzie zaimplementować w programach do symulacji komputerowej procesów odlewniczych.



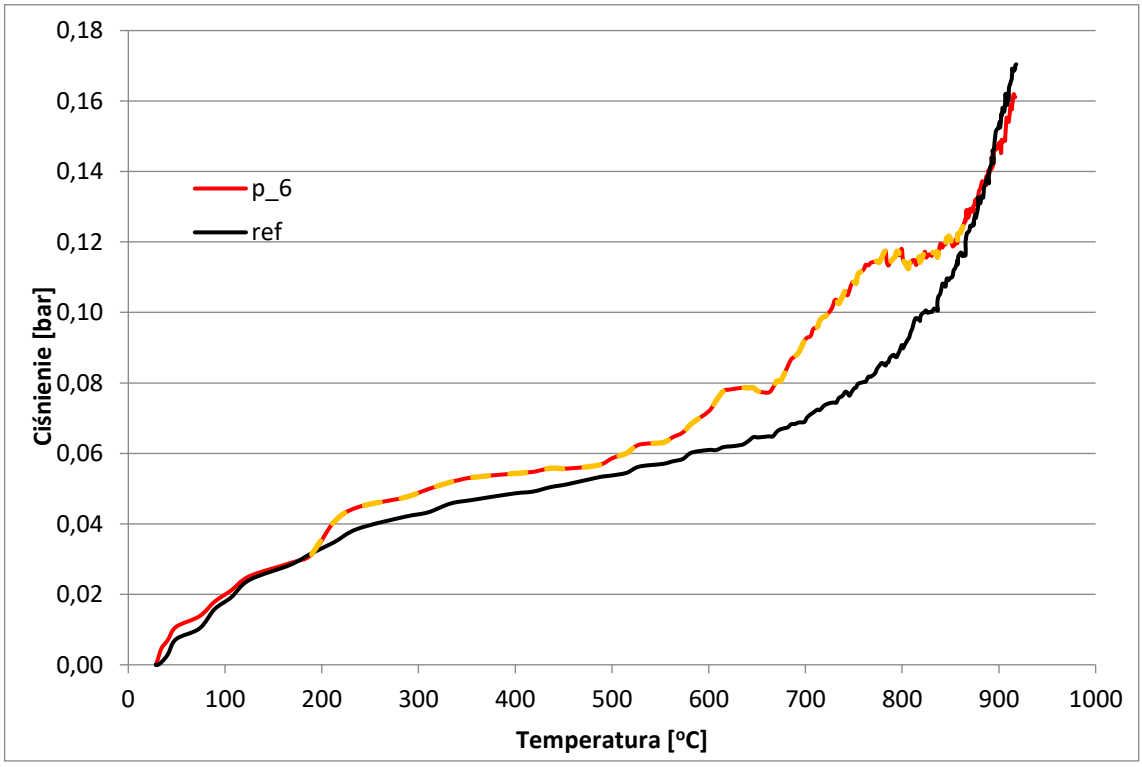
Rys. 7.1.1. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_4.

Pole powierzchni między krzywymi 5,92 bar·K



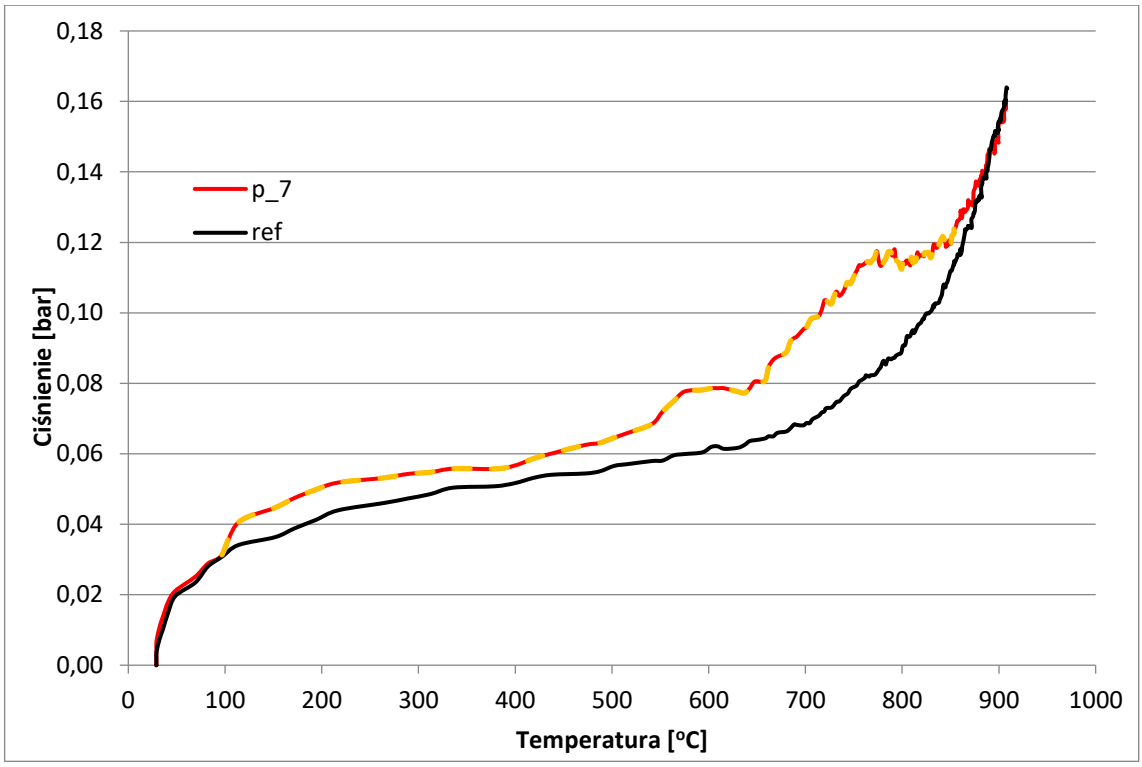
Rys. 7.1.2. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_5.

Pole powierzchni między krzywymi 4,73 bar·K



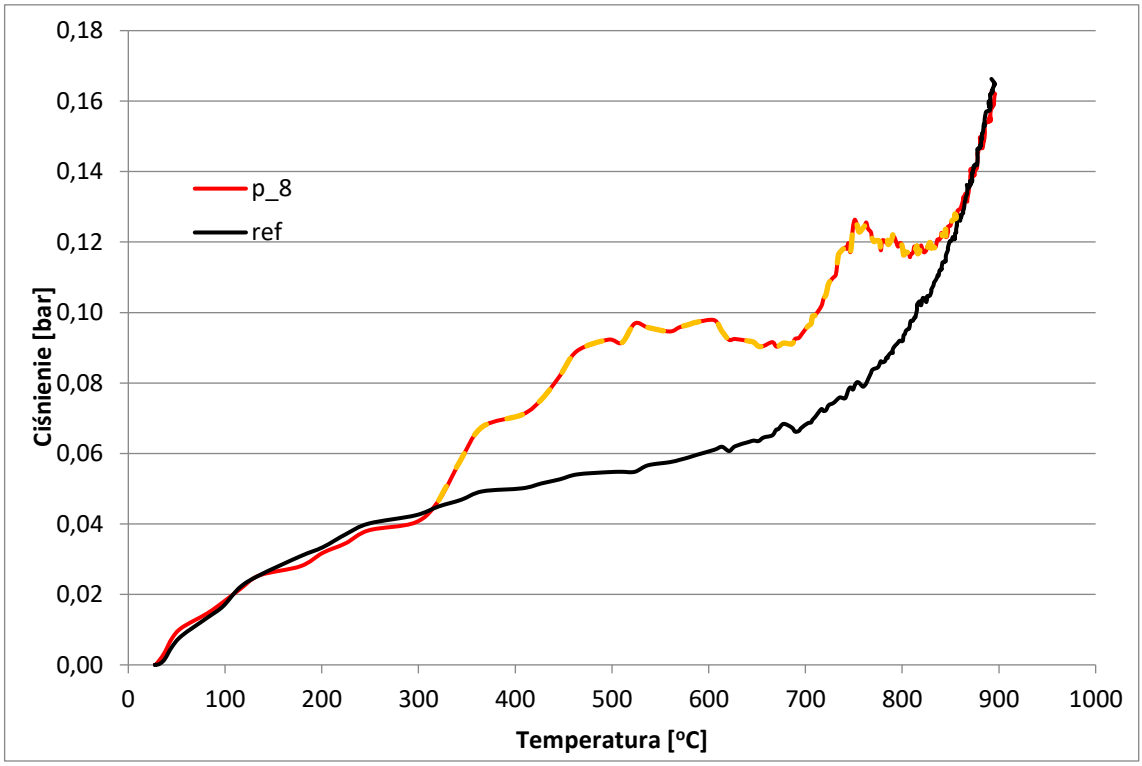
Rys. 7.1.3. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_ 6.

Pole powierzchni między krzywymi 5,77 bar·K



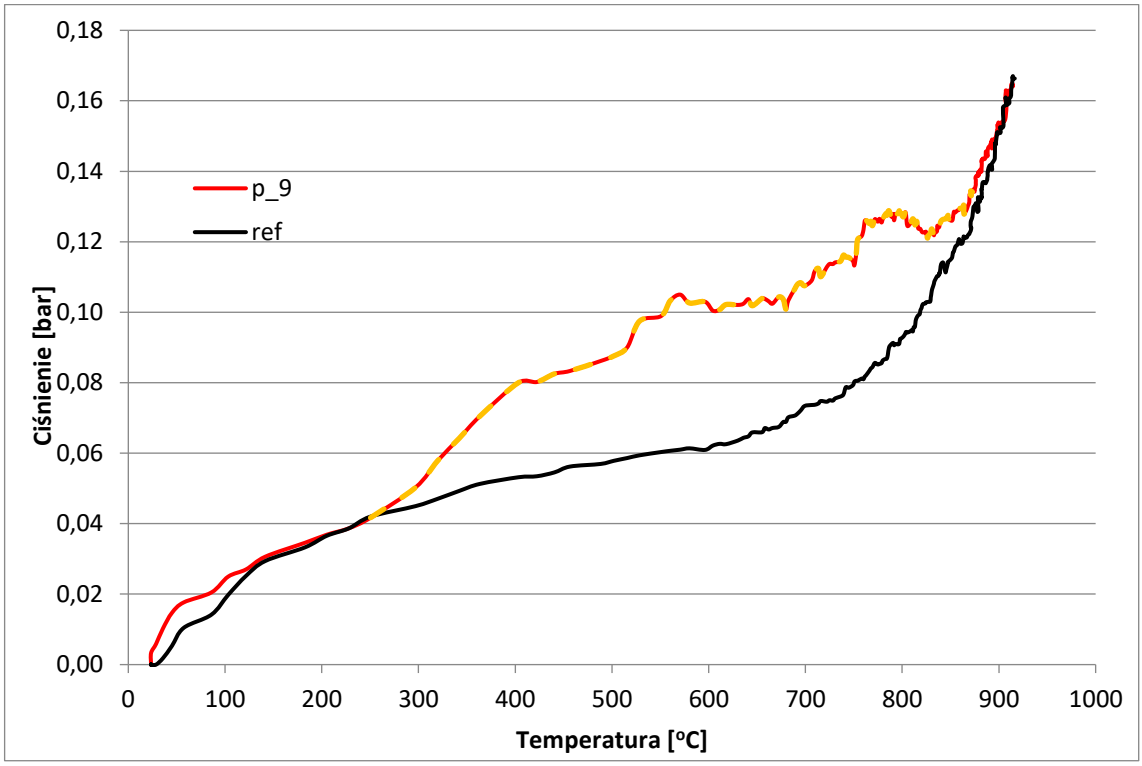
Rys. 7.1.4. Wykres zależności ciśnienia od temperatury – P_ 7.

Pole powierzchni między krzywymi 6,75 bar·K



Rys. 7.1.5. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_ 8.

Pole powierzchni między krzywymi 15,12 bar·K

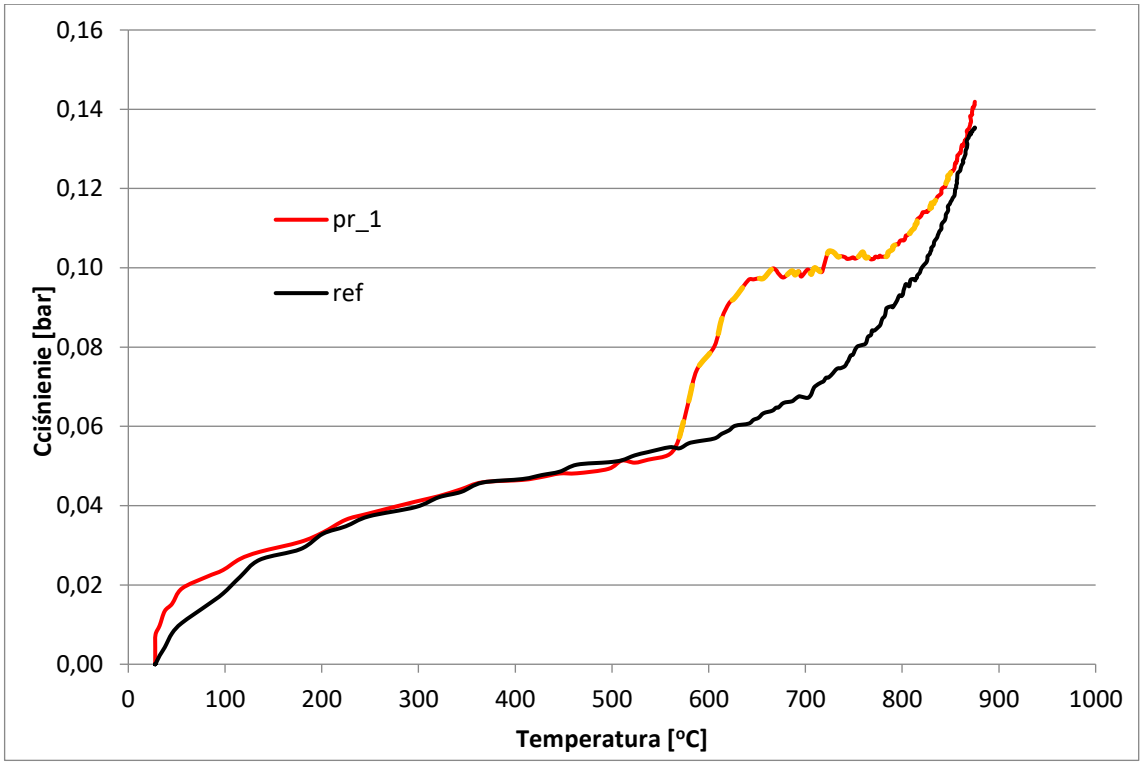


Rys. 7.1.6. Wykres zależności ciśnienia od temperatury – P_ 9

Pole powierzchni między krzywymi 13,50 bar·K

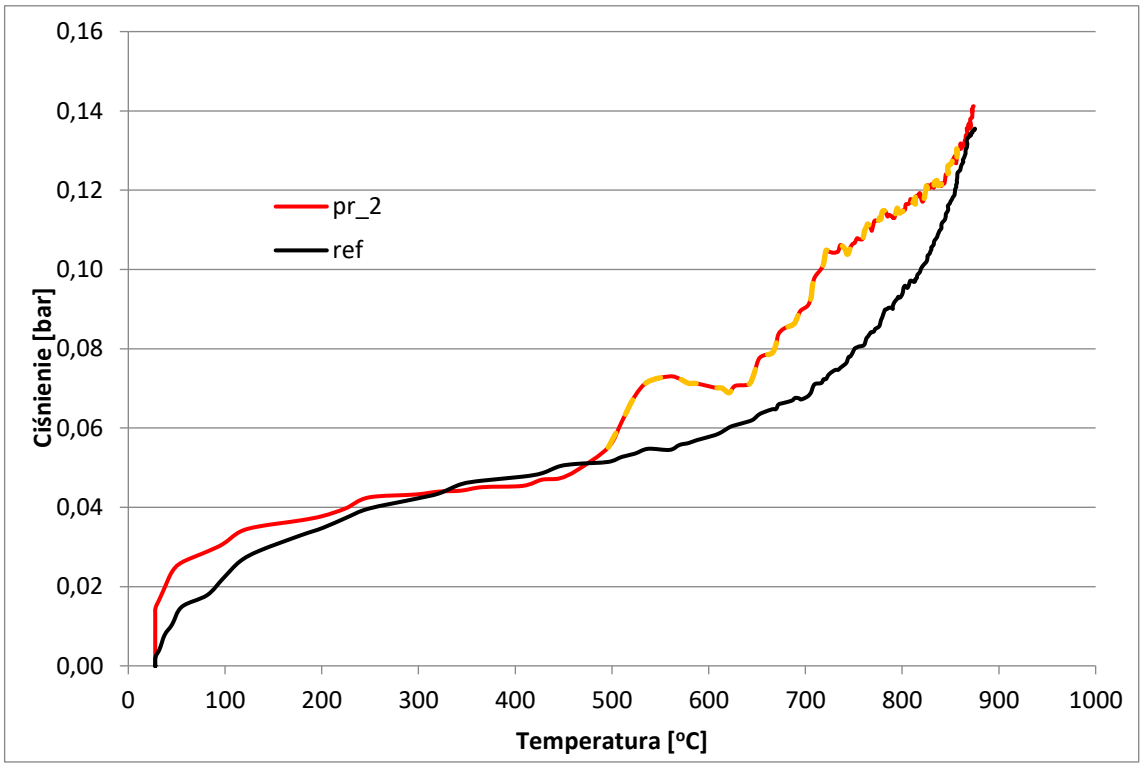
7.2.WYNIKI BADAŃ MATERIAŁÓW NA JEDNORAZOWE MODELE ODLEWNICZE. WYNIKI BADAŃ ZASADNICZYCH

Wartości ciśnienia i temperatury zarejestrowane w badaniach zasadniczych materiałów na modele jednorazowe zostały zaprezentowane na rysunkach 7.2.1-7.2.7. w formie wykresów.



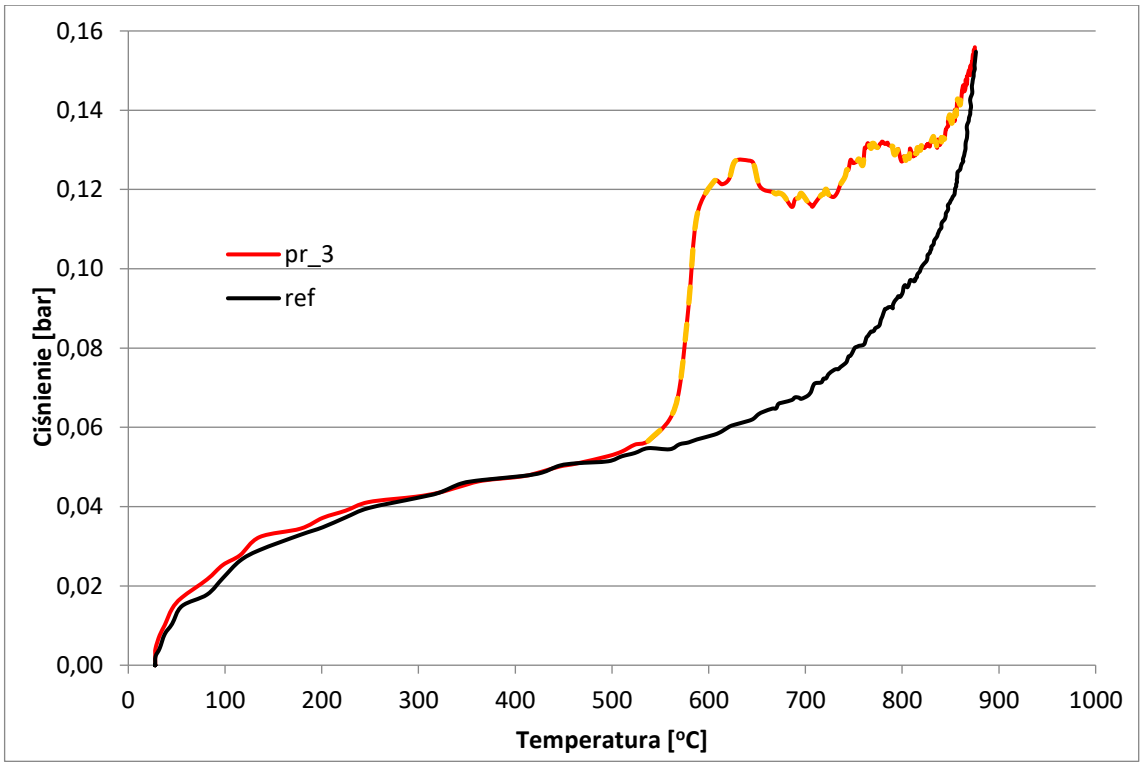
Rys 7.2.1. Wyniki dla próbki PR_1 EPS VFG18.

Pole powierzchni między krzywymi 5,92 bar·K



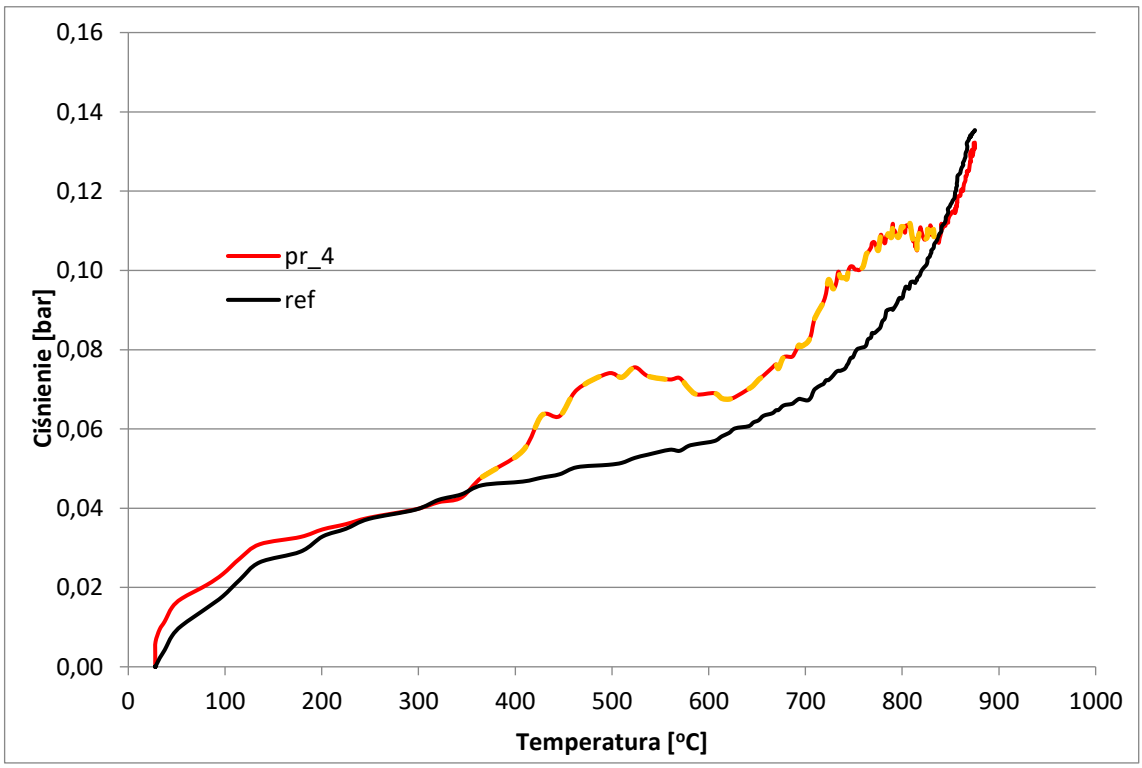
Rys 7.2.2. Wyniki dla próbki PR_2 EPS budowlany.

Pole powierzchni między krzywymi 4,21 bar·K



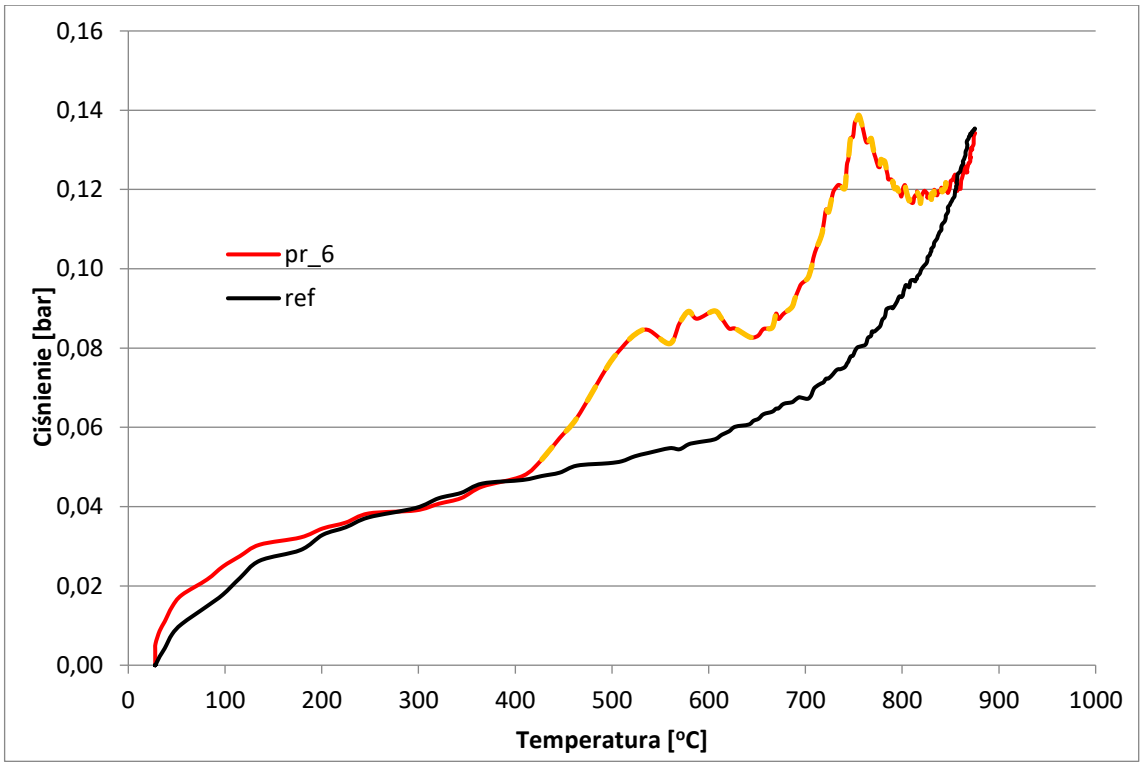
Rys 7.2.3. Wyniki dla próbki PR_3 XPS.

Pole powierzchni między krzywymi 13,46 bar·K



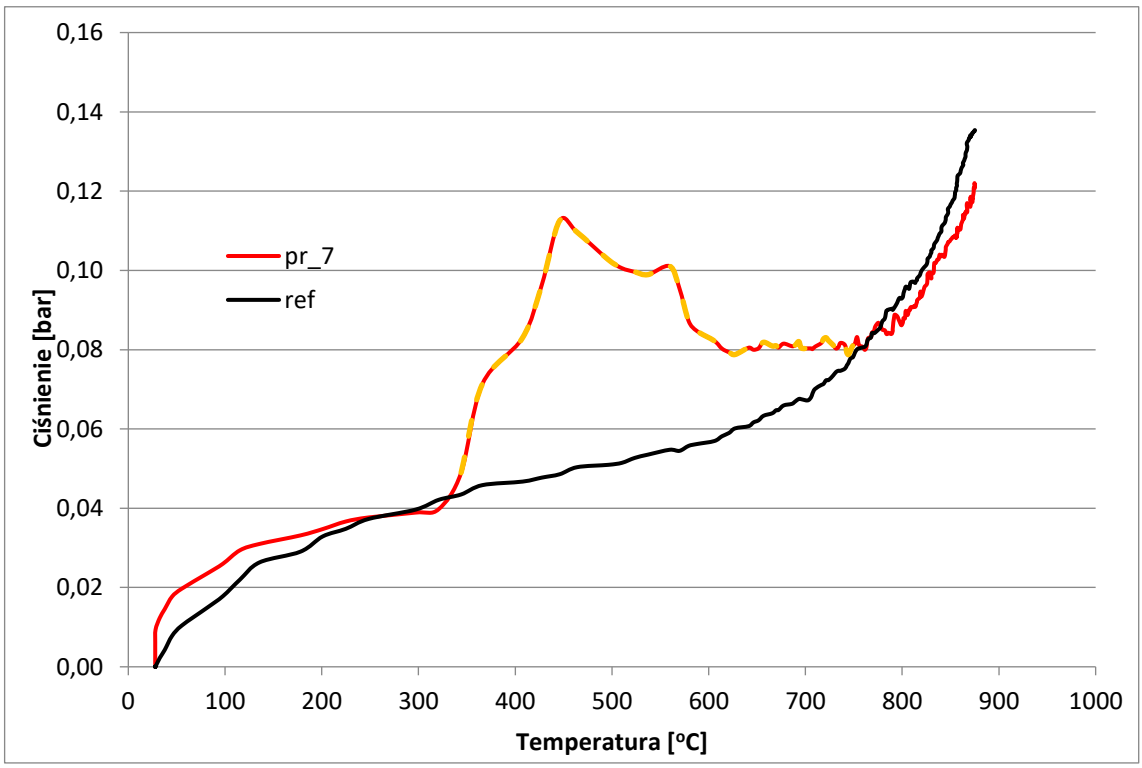
Rys 7.2.4. Wyniki dla próbki PR_4 EPP

Pole powierzchni między krzywymi 5,77 bar·K



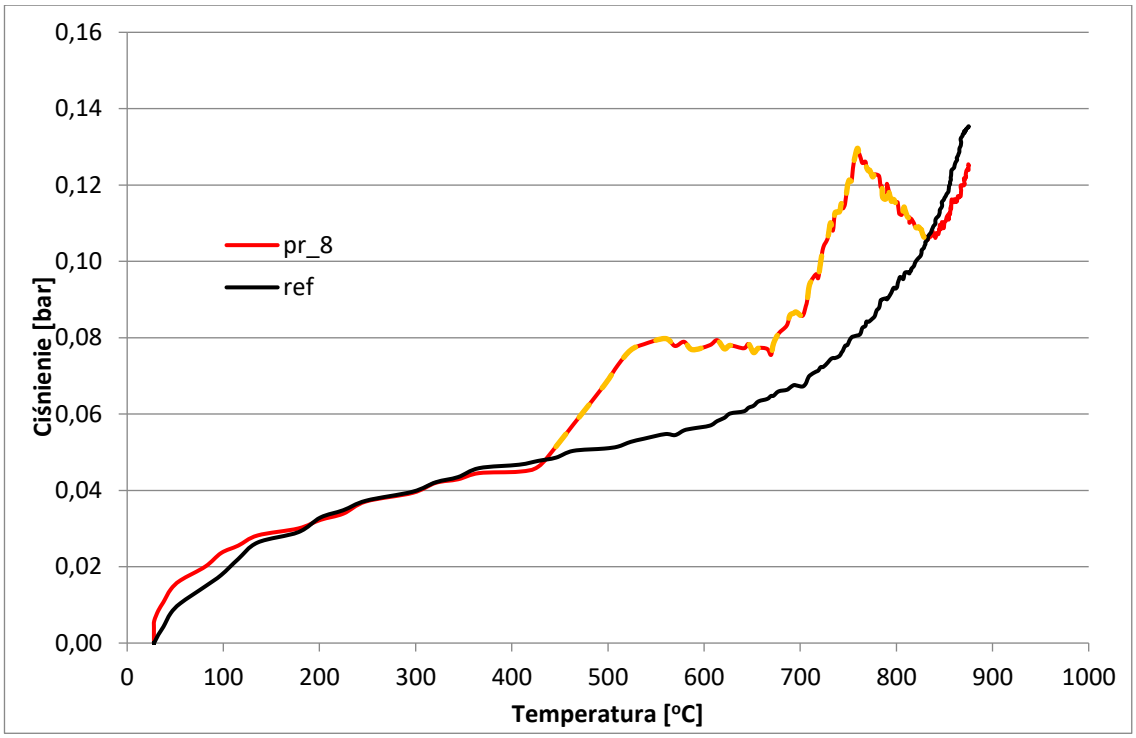
Rys 7.2.5. Wyniki dla próbki PR_6 EPE.

Pole powierzchni między krzywymi 10,11 bar·K



Rys 7.2.6. Wyniki dla próbki PR_7 EPS + PMMA.

Pole powierzchni między krzywymi 10,01 bar·K



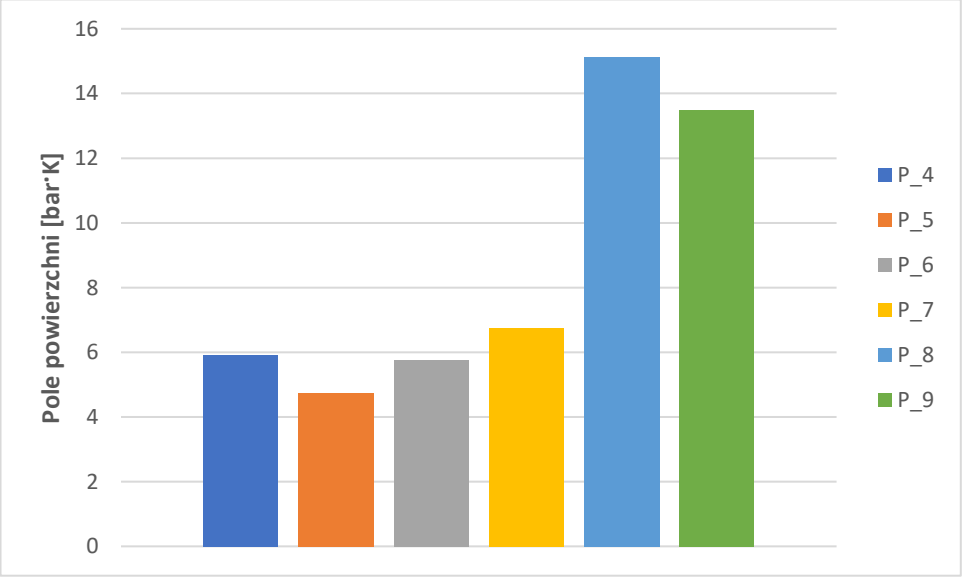
Rys 7.2.7. Wyniki dla próbki PR_8 EPE.

Pole powierzchni między krzywymi 7,01 bar·K

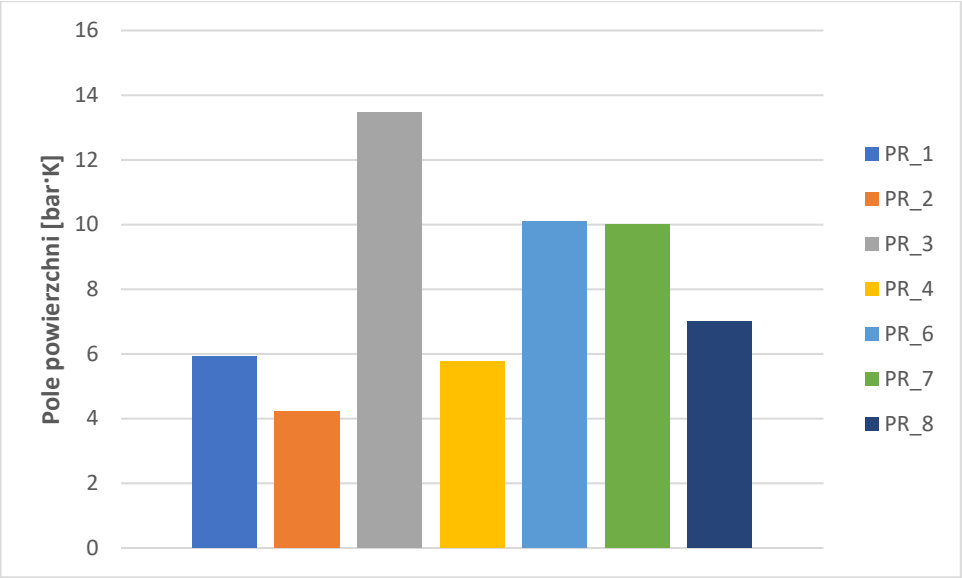
Obliczone wartości pola powierzchni pomiędzy krzywymi pomiarowymi, a krzywą referencyjną zostały przedstawione w tabeli 7.2.1. Natomiast graficznie porównanie wyników pola powierzchni dla badań testowych został przedstawiony na rys.7.2.8., a dla badań zasadniczych na rys. 7.2.9.

Tabela 7.2.1. Zestawienie wartości obliczeniowych pola powierzchni pomiędzy krzywą referencyjną, a badaną

BADANIA TESTOWE		
L.p.	Obliczone pole powierzchni [bar·K]	Oznaczenie
1	5,92	P_4
2	4,73	P_5
3	5,77	P_6
4	6,75	P_7
5	15,12	P_8
6	13,50	P_9
BADANIA ZASADNICZE		
	Obliczone pole powierzchni [bar·K]	
1	5,92	PR_1
2	4,21	PR_2
3	13,46	PR_3
4	5,77	PR_4
5	10,11	PR_6
6	10,01	PR_7
7	7,01	PR_8



Rys.7.2.8. Zestawienie obliczonego pola powierzchni dla badań testowych



Rys. 7.2.9. Zestawienie obliczonego pola powierzchni dla badań zasadniczych

Przedstawione wyniki badań testowych wskazują zróżnicowane wartości ciśnienia w czasie spalania badanych próbek. Znacząca różnica została zarejestrowana dla próbek z dodatkiem kleju w porównaniu próbek pozbawionych warstwy kleju.

Dla badań zasadniczych materiał EPS 70 wykazał najniższą wartość ciśnienia w trakcie spalania. Może to sugerować, iż materiał ten wykazuje najkorzystniejsze własności zgazowania, spośród badanych materiałów, w ujęciu ilościowym. Niestety materiał ten w swoim składzie chemicznym zawiera znaczące ilości siarki co może wpływać negatywnie na jakość metalurgiczną żeliwa, a tym samym prowadzić do powstawania wad odlewów.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczona została gęstość produktów pirolizy badanych w obu etapach materiałów. Otrzymane wartości gęstości zgazowanego materiału zestawiono w tabelach 7.2.2. i 7.2.3. odpowiednio dla badań wstępnych i zasadniczych.

Tabela 7.2.2. Wyniki obliczeń gęstości produktów pirolizy – badania wstępne

L.p.	Oznaczenie	Materiał	Masa próbki [g]	Δp [bar]	Przyrost objętości V_2-V_1 [cm^3]	Gęstość produktów pirolizy [k/m^3]
1	P_4	EPS 70	0,216	0,017259	91,4732	2,3613
2	P_5	EPS 70	0,204	0,016558	87,7598	2,3245
3	P_6	EPS 70	0,237	0,018432	97,6904	2,4260
4	P_7	EPS 70	0,199	0,015504	82,1694	2,4218
5	P_8	EPS 70	0.257	0,029560	156,6667	1,6404
6	P_9	EPS 70	0.327	0,025455	134,9102	2,4238

Tabela 7.2.3. Wyniki obliczeń gęstości produktów pirolizy – badania zasadnicze

L.p.	Oznaczenie	Materiał	Masa próbki [g]	Δp [bar]	Przyrost objętości V_2-V_1 [cm^3]	Gęstość produktów pirolizy [k/m^3]
1	PR_1	EPS VFG18	0,123	0,021844	115,7726	1,0624
2	PR_2	EPS 70	0,178	0,014973	79,3557	2,2430
3	PR_3	XPS	0,268	0,041656	220,7755	1,2139
4	PR_4	EPP	0,167	0,014079	74,61722	2,2381
5	PR_6	EPE	0,270	0,026251	139,1322	1,9406
6	PR_7	EPS + PMMA	0,118	0,028301	149,9939	0,7867
7	PR_8	EPE	0,206	0,020869	110,6056	1,8624

Wartości gęstości otrzymane dla próbek zbadanych w etapie zasadniczym są bardzo zbliżone co nie jest zaskoczeniem ponieważ wszystkie wykonane zostały z polistyrenu spienionego budowlanego. Stanowią natomiast potwierdzenie poprawności koncepcji metodyki pomiaru i założeń konstrukcyjnych opracowanego stanowiska. Jedynym odbiegającym od pozostałych wynikiem jest wartości gęstości uzyskana dla próbki klejonej z użyciem kleju polimerowego niska wartość gęstości świadczy o dużej, w porównaniu do próbek „czystych” objętości produktów pirolizy co oczywiście jest niekorzystne z punktu widzenia procesu wypełniania formy. Pozytywnym, z tego samego punktu widzenia, jest wynik otrzymany dla próbki klejonej dedykowanym do łączenia modeli w metodzie Lost Foam. Wartość gęstości niemal identyczna z wartościami otrzymanymi dla próbek „czystych” świadczy o minimalnej ilości produktów pirolizy użytego kleju.

Wartości gęstości produktów zgazowania badanych w drugim etapie materiałów stanowią podstawę do oszacowania możliwości ich potencjalnego użycia do wykonywania jednorazowych modeli odlewniczych. Jedynie wyniki otrzymane dla próbek PR_4 (EPP) oraz PR_6 i PR_8 (EPE) wskazują na możliwość wykorzystania tych materiałów na jednorazowe modele.

7.3. BADANIA LABORATORYJNE PRZEPUSZCZALNOŚCI MASY FORMIERSKIEJ

Wyniki badań laboratoryjnych przepuszczalności próbek masy formierskiej oraz obliczone na ich podstawie wartości natężenia przepływu zostały zaprezentowane: dla próbek bez pokrycia w tab. 7.3.1., natomiast dla próbek z pokryciem w tab. 7.3.2. Brak wyniku pomiaru świadczy o odrzuceniu próbki z powodu widocznych defektów zagęszczania lub innych przyczyn związanych z przygotowaniem próbek do badania.

Tabela 7.3.1. Wyniki przepuszczalności masy formierskiej dla próbek bez pokrycia

L.p.	Przepuszczalność [$(m^2/Pa \cdot s) \cdot 10^{-8}$]				Przepuszczalność [$m^2/Pa \cdot s$]	Przeliczenie na [$cm^2/mbar/min$]	Objętościowe natężenie przepływu [cm^3/min]
1	1.1	1.2	1.3	Średnia	$4{,}07 \cdot 10^{-6}$	243,92	9396,72
	408	407,6	404	406,5			
2	2.1	2.2	2.3	Średnia	$2{,}88 \cdot 10^{-6}$	172,65	6651,13
	-	286,1	289,4	287,8			
3	3.1	3.2	3.2	Średnia	$2{,}83 \cdot 10^{-6}$	169,72	6534,40
	283,2	284,7	280,7	282,9			
4	4.1	4.2	4.3	Średnia	$3{,}77 \cdot 10^{-6}$	225,92	8690,96
	377,6	377,6	374,4	376,5			
5	5.1	5.2	5.3	Średnia	$4{,}64 \cdot 10^{-6}$	278,34	10847,53
	458,5	469,3	-	463,9			
6	6.1	6.2	6.3	Średnia	$3{,}79 \cdot 10^{-6}$	227,44	8788,04
	376,8	380,4	380	379,1			
7	7.1	7.2	7.3	Średnia	$4{,}90 \cdot 10^{-6}$	293,82	11309,81
	490,5	482,1	496,5	489,7			
8	8.1	8.2	8.3	Średnia	$4{,}88 \cdot 10^{-6}$	292,76	11248,56
	490,5	483,5	489,8	487,9			
9	9.1	9.2	9.3	Średnia	$3{,}01 \cdot 10^{-6}$	180,38	7003,62
	295,9	301,6	304,4	300,6			
10	10.1	10.2	10.3	Średnia	$2{,}48 \cdot 10^{-6}$	148,62	5843,29
	242,6	252,8	-	247,7			
11	11.1	11.2	11.3	Średnia	$4{,}05 \cdot 10^{-6}$	242,72	9375,15
	402,4	404,8	406,4	404,5			

Tabela 7.3.2. Wyniki przepuszczalności masy formierskiej dla próbek z pokryciem

L.p.	Przepuszczalność [$(m^2/Pa \cdot s) \cdot 10^{-8}$]				Przepuszczalność [$m^2/Pa \cdot s$]	Przeliczenie na [$cm^2/mbar/min$]	Objętościowe natężenie przepływu [cm^3/min]
1	1.1	1.2	1.3	Średnia	$1{,}85 \cdot 10^{-7}$	11,08	426,84
	19,5	11,8	24,1	18,5			
2	2.1	2.2	2.3	Średnia	$1{,}78 \cdot 10^{-7}$	10,66	410,66
	22,6	18,4	12,3	17,8			
3	3.1	3.2	3.2	Średnia	$1{,}44 \cdot 10^{-7}$	8,66	333,62
	11,2	10,7	21,4	14,4			
4	4.1	4.2	4.3	Średnia	$2{,}15 \cdot 10^{-7}$	12,92	497,73
	25,3	11,8	27,5	21,5			
5	5.1	5.2	5.3	Średnia	$2{,}25 \cdot 10^{-7}$	13,50	520,07
	23,0	22,0	-	22,5			
6	6.1	6.2	6.3	Średnia	$1{,}56 \cdot 10^{-7}$	9,36	360,58
	17,0	18,5	11,3	15,6			
7	7.1	7.2	7.3	Średnia	$1{,}82 \cdot 10^{-7}$	10,90	419,91
	13,9	18,5	22,1	18,2			
8	8.1	8.2	8.3	Średnia	$1{,}59 \cdot 10^{-7}$	9,54	367,52
	15,2	18,5	22,1	15,9			
9	9.1	9.2	9.3	Średnia	$1{,}28 \cdot 10^{-7}$	7,68	295,86
	13,0	13,6	11,8	12,8			
10	10.1	10.2	10.3	Średnia	$1{,}60 \cdot 10^{-7}$	9,57	368,67
	16,8	15,1	-	16,0			
11	11.1	11.2	11.3	Średnia	$1{,}63 \cdot 10^{-7}$	9,80	377,53
	37,8	-	11,2	16,3			

7.4. KOMPUTEROWA SYMULACJA PRZEPUSZCZALNOŚCI

Obliczone wartości oporności wewnętrznej dla średnicy zastępczej osnowy masy formierskiej, widoczne w tab 7.4.1., stanowią stałe wartości wejściowe w modelowaniu wirtualnego pomiaru przepuszczalności. Kolejnym parametrem wejściowym charakteryzującym materiał porowaty w kontekście przepływu płynu jest Internal Resistant, (IR). Jego wartość jest uzależniona m.in. od procentowego udziału porów otwartych w materiale porowatym. Dla badanych materiałów formierskich jest to wartość nieznana dlatego w obliczeniach założono trzy poziomy udziału porów otwartych. W tabeli 7.4.2. zestawione zostały wartości IR dla trzech średnic zastępczych ziarna osnowy i przyjętych udziałów porów otwartych przy założeniu identycznych warunków przepuszczalności w każdym kierunku.

Tabela 7.4.1. Viscous Resistance i przepuszczalność dla trzech wielkości średnic zastępczych ziarna masy formierskiej

L.p.	Średnica zastępcza ziarna [m]	Viscous Resistance $\left[\frac{1}{m^2}\right]$	VR dla próbki Ø50x50 $\left[\frac{1}{m^2}\right]$
1	0,00029	2373,21	47464,26
2	0,00030	2373,21	47464,26
3	0,00031	2373,21	47464,26

Tabela 7.4.2. Wyniki obliczeń wartości Inertial Resistant dla 100%, 50 i 25% otwartych porów

L.p.	Średnica zastępcza ziarna [m]	Inertial Resistant100% $\left[\frac{1}{m}\right]$	Inertial Resistant 50% $\left[\frac{1}{m}\right]$	Inertial Resistant 25% $\left[\frac{1}{m}\right]$
1	0,00029	801082,1	2997597,7	6408657,0
2	0,0003	774379,4	3097517,6	6195035,1
3	0,00031	749399,4	3204328,5	5995195,3

Zestawienie wartości przepuszczalności zmierzonej laboratoryjnie z zasymulowanymi dla przyjętych wielkości parametrów wejściowych przedstawiono w tabeli 7.4.3.

Tabela 7.4.3. Zestawienie rzeczywistych wartości wyników przepuszczalności z zasymulowanymi wartościami

L.p.	Udział osnowy		Przepuszczalność $\left[\left(\frac{m^2}{Pa \cdot s}\right) \cdot 10^{-8}\right]$				Dla IR 100%	Dla IR 50%	Dla IR 25%
	Regenerat	Świeży piasek	1.1	1.2	1.3	Średnia	Wynik	Wynik	Wynik
1	100	0	408,0	407,6	404,0	406,5	628,5	603,9	573,9
2	0	100	-	286,1	289,4	287,8	628,0	602,0	566,1
3	50	50	283,2	284,7	280,7	282,7	628,3	603,0	568,3

Następnie przeprowadzony został proces iteracyjnego rozwiązania zadania odwrotnego metodą prób i selekcji w celu określenia wartości IR dla której różnica wartości przepuszczalności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów wyniesie maksymalnie 2%. Wyniki obliczeń przedstawione zostały w tabeli 7.4.4. stanowią one podstawę do oszacowania udziału porów otwartych w rzeczywistych próbkach badanej masy formierskiej. W tym celu posiadane dane poddano analizie statystycznej metodą estymacji nieliniowej co pozwoliło na określenie postaci zależności zmian porowatości otwartej w funkcji wartości IR oraz wartości jej współczynników.

Tabela 7.4.4. Wyniki badań przepuszczalności wykonane na aparacie LPiR-3e, wartości przepuszczalności obliczone dla IR oszacowanego w zadaniu odwrotnym

L.p.	Udział osnowy		Przepuszczalność $\left[\left(\frac{m^2}{Pa \cdot s}\right) \cdot 10^{-8}\right]$				Inertial Resistant $\left[\frac{1}{m}\right]$	Przepuszczalność $zassymulowana$ $\left[\left(\frac{m^2}{Pa \cdot s}\right) \cdot 10^{-8}\right]$
	Regenerat	Świeży piasek	1.1	1.2	1.3	Średnia		
1	100	0	408,0	407,6	404,0	406,5	8000000	412,8
2	0	100	-	286,1	289,4	287,8	8250000	286,5
3	50	50	283,2	284,7	280,7	282,7	8250000	286,5

Testowany model w zapisie ogólnym przedstawia zależność (16):

$$y = B0 + B1 \cdot x^2 + B2 \cdot x \tag{16}$$

gdzie:

B0 – wyraz wolny równania,

B1, B2 – współczynniki równania,

x – wartość porowatości otwartej.

Wartości współczynników zależności dla każdej z analizowanych średnic zastępczych (skład osnowy masy formierskiej) wraz z wartościami statystycznych parametrów zostały przedstawione w tabelach 7.4.5.-7.4.7.

Tabela 7.4.5. Wartości współczynników zależności i parametrów statystycznych dla średnicy zastępczej 0,00029m

Całkowita strata	0,000082082		
Wsp. korelacji	R=1,0		
	B0	B1	B2
Ocena	11361584,19	1233,49	-228954,44
Błąd standardowy	2,E-02	7,E-06	8,E-04
p (istotność)	1,E-09	3,E-09	2,E-09

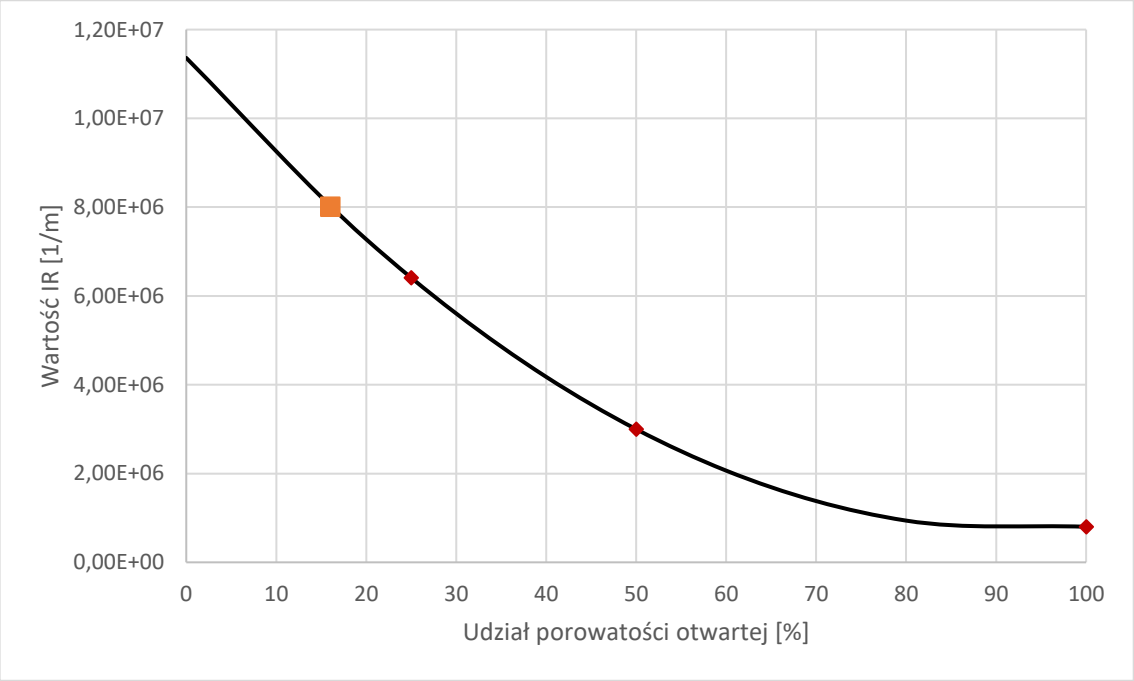
23Tabela 7.4.6. Wartości współczynników zależności i parametrów statystycznych dla średnicy zastępczej 0,00030m

Całkowita strata	0,094839525		
Wsp. korelacji	R=1,0		
	B0	B1	B2
Ocena	10583185,94	1032,51	-201338,67
Błąd standardowy	5,E-01	2,E-04	2,E-02
p (istotność)	3,E-08	1,E-07	7,E-08

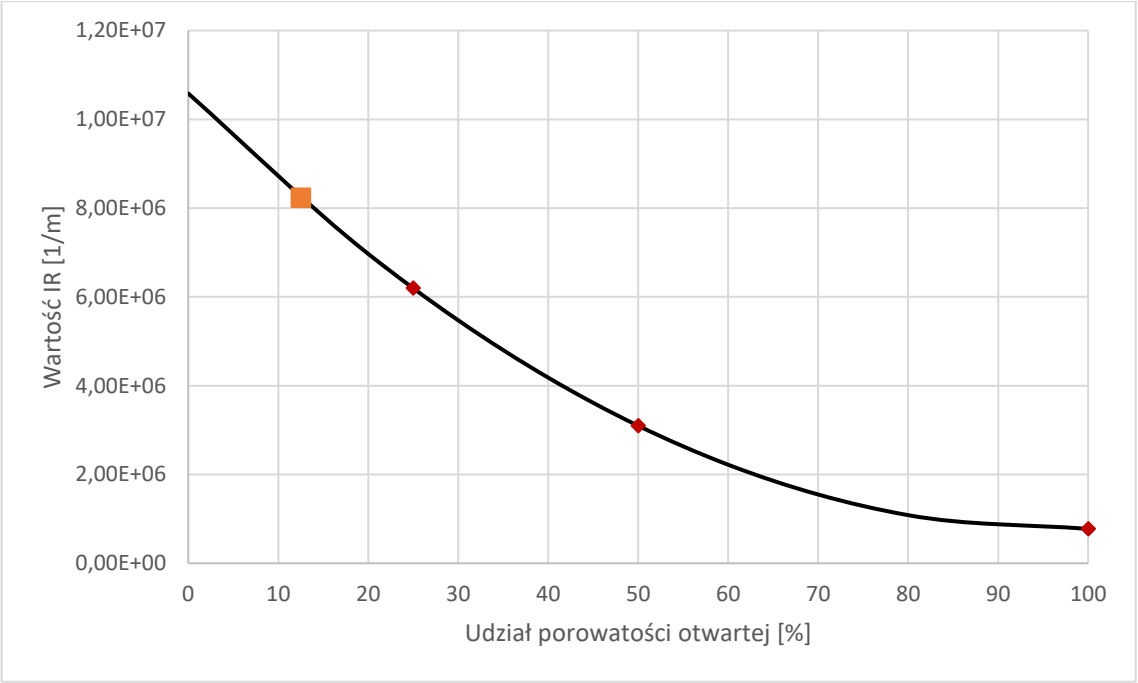
Tabela 7.4.7. Wartości współczynników zależności i parametrów statystycznych dla średnicy zastępczej 0,00031m

Całkowita strata	0,000006107		
Wsp. korelacji	R=1,0		
	B0	B1	B2
Ocena	9828330,22	833,81	-174170,76
Błąd standardowy	3,48E-03	1,46E-06	1,69E-04
p (istotność)	2,25E-10	1,12E-09	6,19E-10

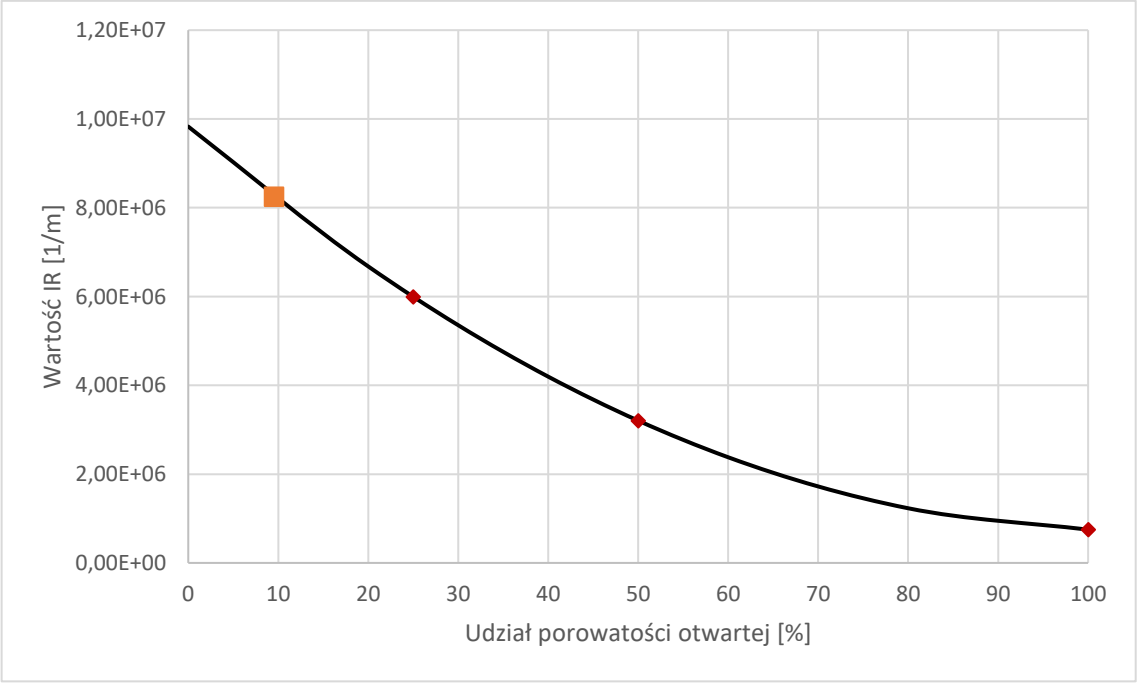
Graficznie opracowane zależności przedstawione zostały na rysunkach 7.4.1.-7.4.3. Na wykresach naniesione zostały punkty wartości IR obliczonej dla udziału porowatości otwartej 100 50 i 25% jako podstawy opracowanej zależności oraz punkt wartości IR dla oszacowanej na tej podstawie wartości procentowego udziału porów otwartych w próbce rzeczywistej. Wartości IR wraz z oszacowanymi na tej podstawie uśrednionej porowatości próbek rzeczywistych zastawiono w tabeli 7.4.8.



Rys. 7.4.1. Udział porowatości otwartej w zależności od wartości IR dla średnicy zastępczej 0,00029 m^2



Rys.7.4.2. Udział porowatości otwartej w zależności od wartości IR dla średnicy zastępczej 0,00030 m^2



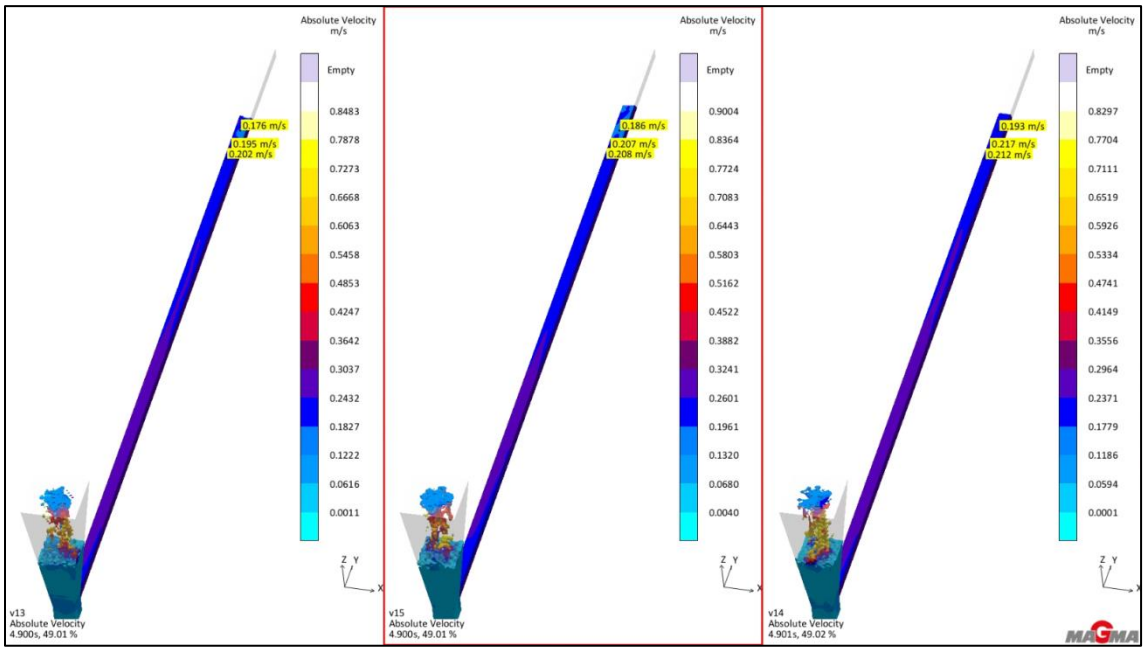
Rys. 7.4.3. Udział porowatości otwartej w zależności od wartości IR dla średnicy zastępczej 0,00031 m^2

Tabela 7.4.8. Wartości IR wraz z oszacowanymi na tej podstawie uśrednionej porowatości próbek rzeczywistych

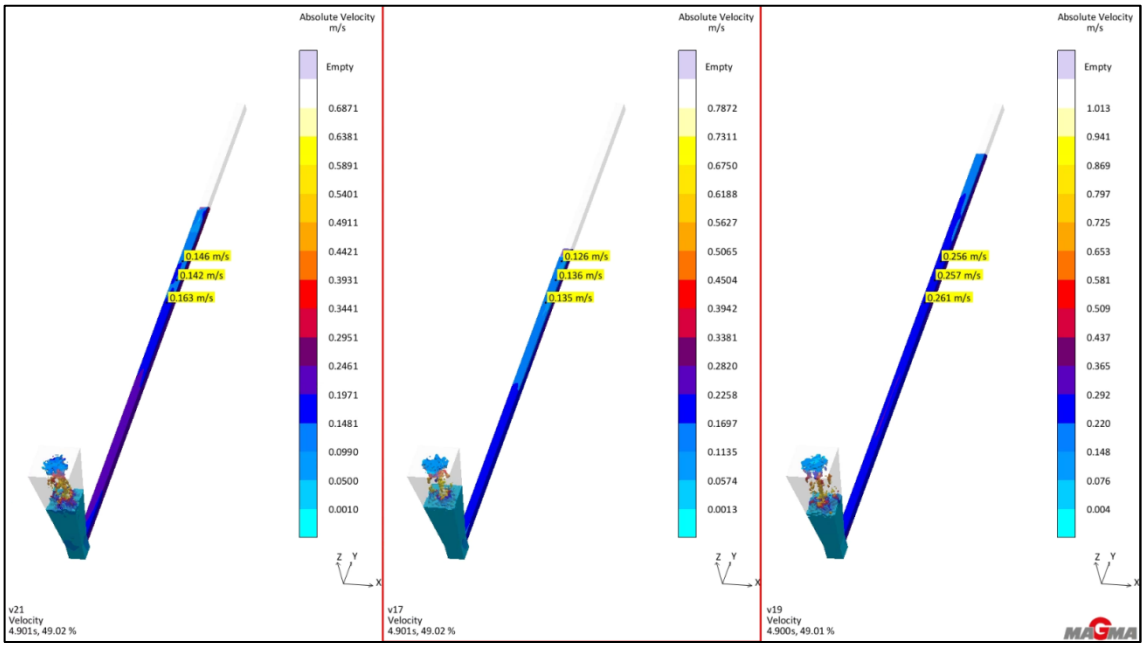
L.p.	Średnica zastępcza ziarna [m]	Inertial Resistant $\left[\frac{1}{m}\right]$	Udział porowatości otwartej [%]
1	0,00029	8277849	16
2	0,0003	8001920	12,5
3	0,00031	7743794	9,5

7.5. PRÓBA LEJNOŚCI RUFFA. BADANIA SYMULACYJNE

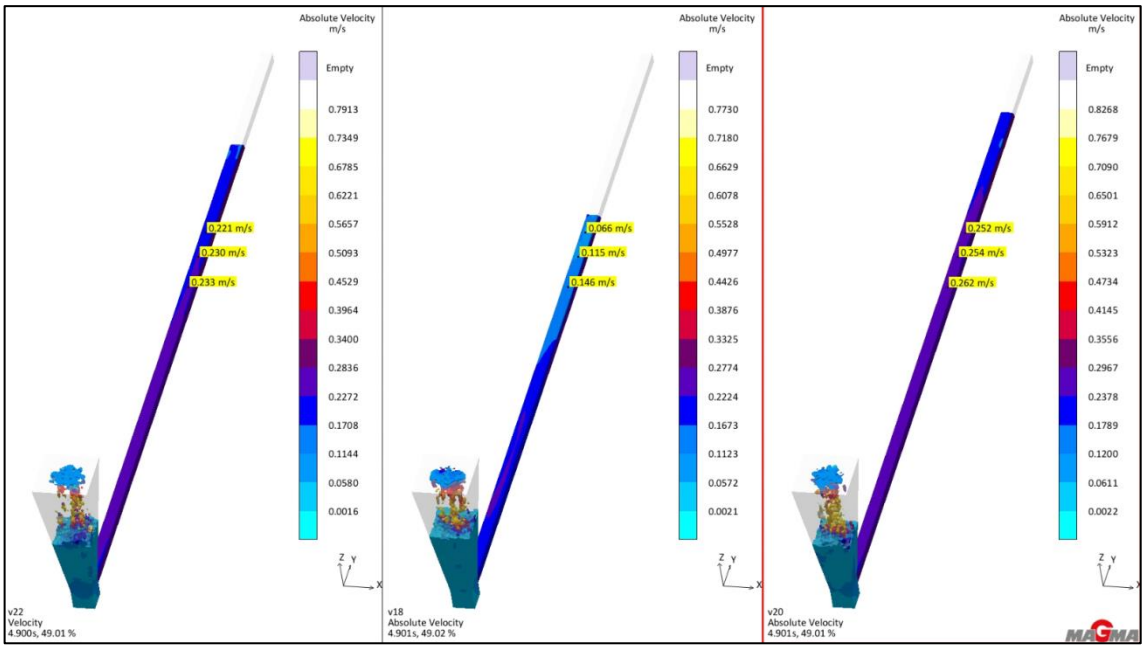
Wyniki symulacji komputerowej wypełniania wnęki formy próby lejności Ruffa przedstawiono w formie wizualizacji rozkładu prędkości metalu w trakcie zalewania formy przedstawiono na rysunkach 7.5.1.-7.5.3. W obliczeniach zaimplementowane zostały wartości właściwości masy formierskiej określone we wcześniejszych badaniach laboratoryjnych, tj. przepuszczalność określona dla masy formierskiej o określonej ziarnistości osnowy z uwzględnieniem pokrycia, ilość produktów pirolizy styropianu EPS70. Na rysunku 7.5.1. przedstawione zostały wyniki dla masy furanowej bez pokrycia ogniotrwałego, na rysunku 7.5.2. wyniki z zastosowaniem pokrycia alkoholowego Zirkofluid, a na rysunku 7.5.3. wyniki symulacji dla formy z naniesionym pokryciem grafitowym wodnym. Na wszystkich poniższych rysunkach lewy obraz przedstawia wyniki uzyskane dla osnowy masy formierskiej o najmniejszej ziarnistości, a skrajny prawy rysunek wyniki dla największego ziarna osnowy masy formierskiej. Wszystkie rysunki przedstawiają stopień wypełnienia formy w tej samej chwili procesu zapełniania wnęki formy co pozwala uzyskane różnice w wielkości zapełnienia wnęki formy interpretować jako efekt różnej przepuszczalności masy formierskiej. Dodatkowo w analizie otrzymanych wyników uwzględniono wartość prędkości strugi metalu we wnęce formy, graficzne zestawienie wartości prędkości metalu w tej analizowanej chwili procesu zalewania dla wszystkich rozpatrywanych przypadków zaimplementowanych właściwości formy przedstawiono na rysunkach 7.5.4.-7.5.6.



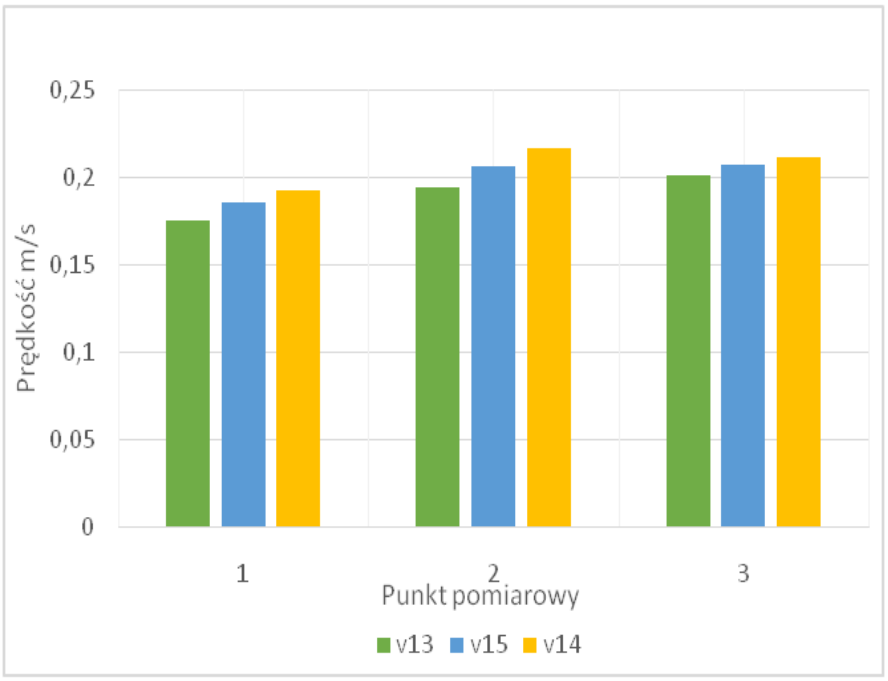
Rys. 7.5.1. wyniki symulacji dla próbek bez pokrycia ogniotrwałego dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej. v13 – frakcja piasku0,10/0,071/0,056 mm, v15 –frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm, v14– frakcja piasku0,63/0,40/0,32 mm



Rys. 7.5.2. Wyniki symulacji dla próbek z pokryciem cyrkonowym alkoholowym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej. v21 – frakcja piasku 0,10/0,071/0,056 mm, v17 - frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm, v19 – frakcja piasku 0,63/0,40/0,32 mm

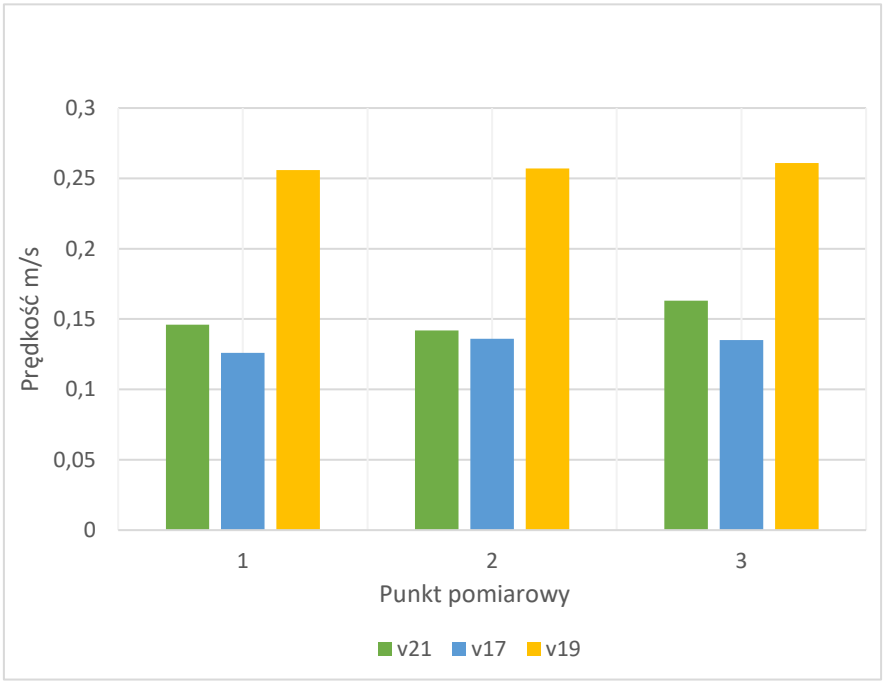


Rys. 7.5.3. Wyniki symulacji dla próbek z pokryciem grafitowym wodnym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej. v22 – frakcja piasku 0,10/0,071/0,056 mm, v18 - frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm, v20 – frakcja piasku 0,63/0,40/0,32 mm



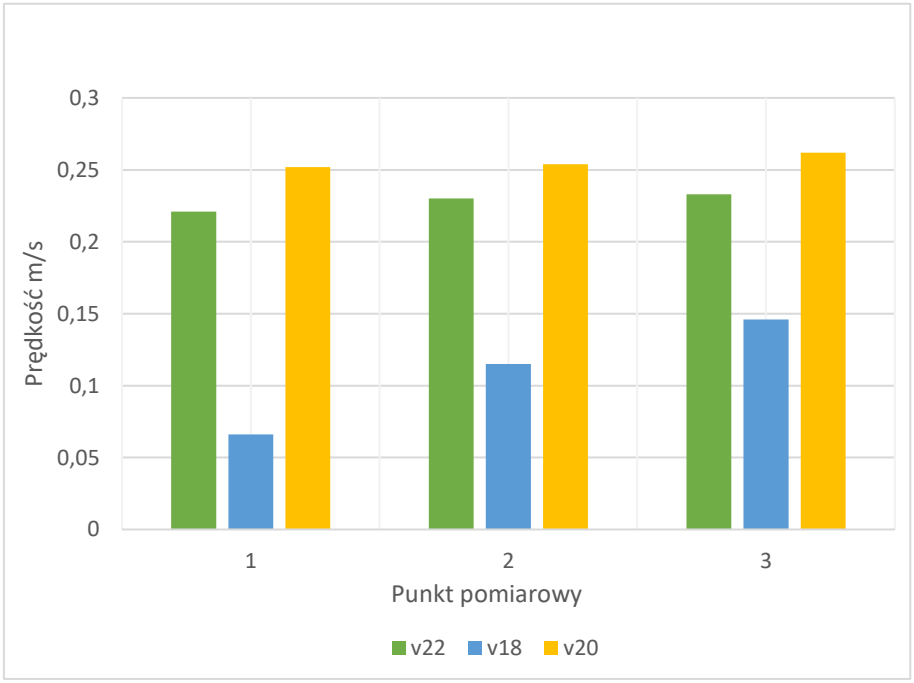
V13- frakcja piasku 0,10/0,071/0,056 mm
V15- frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm
V14- frakcja piasku 0,63/0,40/0,32 mm

Rys. 7.5.4. Zestawienie prędkości strugi ciekłego metalu w punktach pomiarowych w symulacji dla próbek bez pokrycia ogniotrwałego dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej



V21- frakcja piasku 0,10/0,071/0,056 mm
V17- frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm
V19- frakcja piasku 0,63/0,40/0,32 mm

Rys. 7.5.5. Zestawienie prędkości strugi ciekłego metalu w punktach pomiarowych w symulacji dla próbek z pokryciem cyrkonowym alkoholowym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej

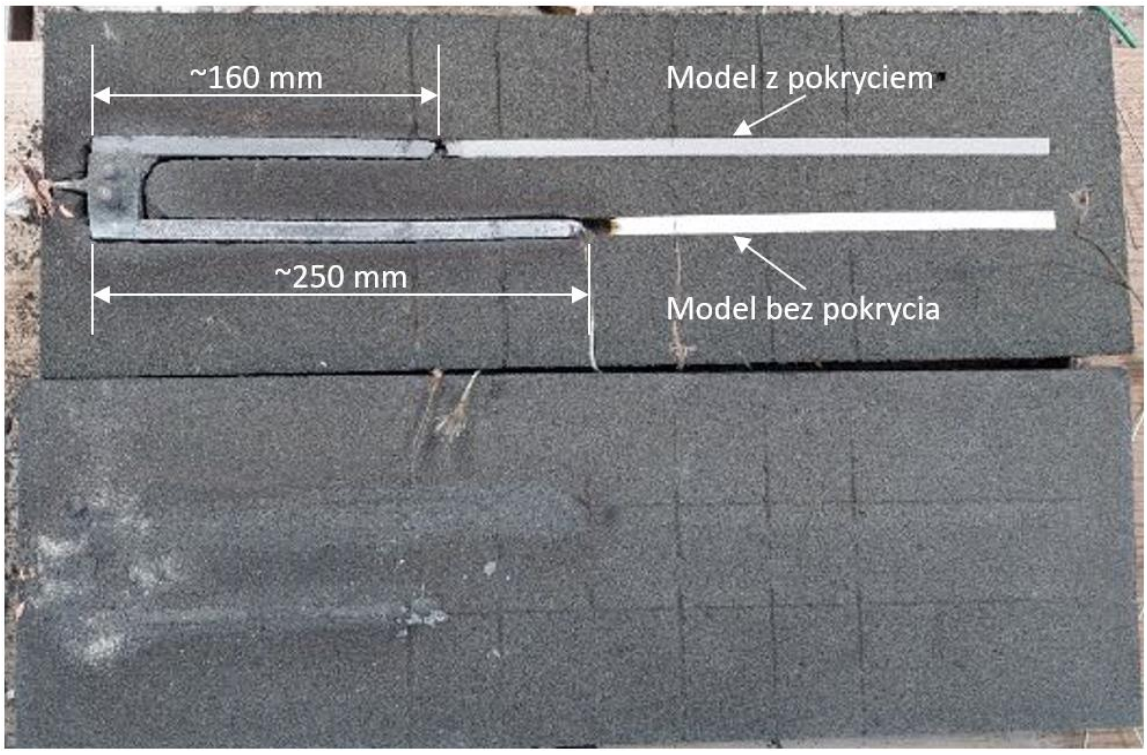


V22- frakcja piasku 0,10/0,071/0,056 mm
V18- frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm
V20- frakcja piasku 0,63/0,40/0,32 mm

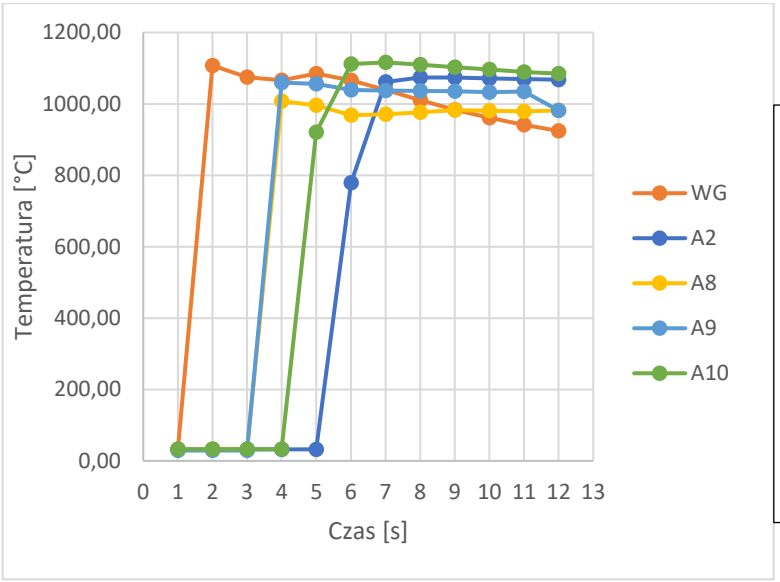
Rys. 7.5.6. Zestawienie prędkości strugi ciekłego metalu w punktach pomiarowych w symulacji dla próbek z pokryciem grafitowym wodnym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej

7.6. PRÓBA LEJNOŚĆI RUFFA. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu weryfikacji danych wykorzystanych w symulacji komputerowej procesu wypełnienia kanałów wnęki formy próby Ruffa, wykonano serię wytopów testowych w ramach, których przeprowadzono próby lejności Ruffa zmodyfikowanej na potrzeby oceny wpływu właściwości formy na stopień wypełnienia formy. Widok otwartej formy z widocznymi różnicami w stopniu wypełnienia kanałów wnęki formy widoczny jest na rys. 7.6.1. Przykładowe wykresy z krzywymi zmian temperatury zarejestrowanymi w formie w punktach pomiarowych dla prób 5 i 6 Przedstawione zostały na rysunkach 7.6.2.-7.6.3. Zestawienie czasów dotarcia ciekłego metalu do punktu pomiarowego dla wszystkich 6 form przedstawiono w tabeli 7.6.1. Niezarejestrowanie wzrostu temperatury w danym punkcie pomiarowym jest równoznaczne z brakiem wypełnienia ciekłym metalem kanału wnęki formy w tej odległości od wlewu głównego.



Rys. 7.6.1. Widok otwartej formy po zalaniu z widocznymi różnicami w stopniu wypełnienia kanałów wnęki formy, próba nr 5



WG – termopara wlew główny,

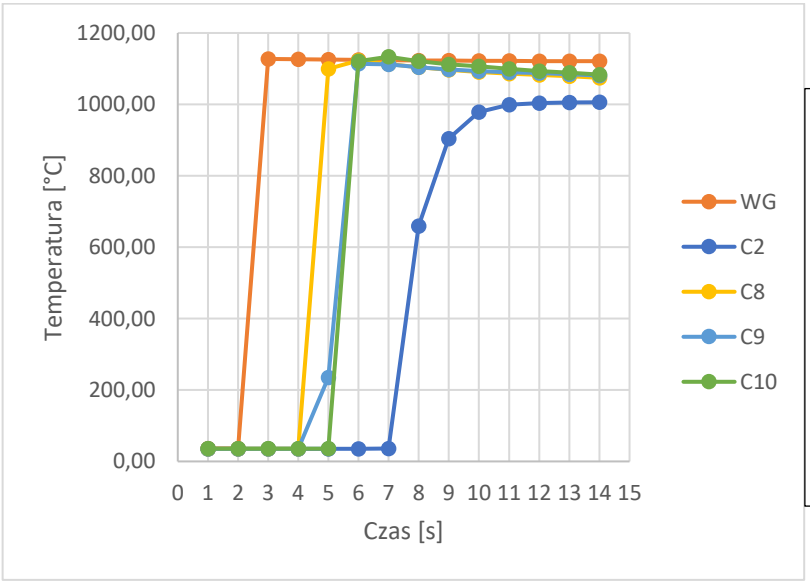
A2 – 1 termopara model z pokryciem,

A8 – 1 termopara model bez pokrycia,

A9 – 2 termopara model bez pokrycia,

A10 – 3 termopara model bez pokrycia

Rys.7.6.2. Zestawienie czasów wypełniania w punktach pomiarowych próby nr 5



WG – termopara wlew główny,

C2 – 1 termopara model z pokryciem,

C8 – 1 termopara model bez pokrycia,

C9 – 2 termopara model bez pokrycia,

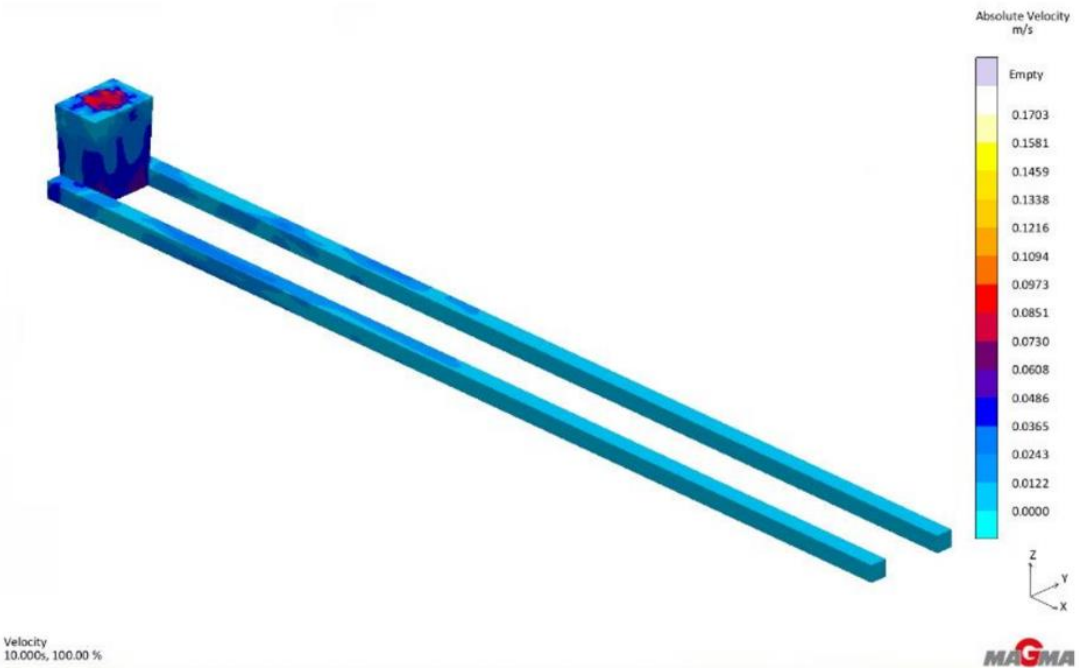
C10 – 3 termopara model bez pokrycia

Rys. 7.6.3 Zestawienie czasów wypełniania w punktach pomiarowych próby nr 6

Tabela 7.6.1. Zarejestrowane czasy zalewania dla 6 form eksperymentalnych

	Wytop 1	Wytop 2	Wytop 3	Wytop 4	Wytop 5	Wytop 6
Model bez pokrycia						
Temp. zal	1235°C	1240°C	1220°C	1260°C	1275°C	1288°C
Termopara 1	3 s	2 s	-	3s	3 s	5 s
Termopara 2	5 s	4 s	-	5s	3 s	6 s
Termopara 3	-	5 s	-	-	5 s	6 s
Termopara 4	-	-	-	-	-	-
Model z pokryciem ogniotrwałym						
Temp. zal	1235°C	1240°C	1220°C	1260°C	1275°C	1288°C
Termopara 1	4 s	4 s	-	5s	6 s	7s
Termopara 2	-	7 s	-	-	-	-
Termopara 3	-	10 s	-	-	-	-
Termopara 4	-	-	-	-	-	-
Termopara 5	-	-	-	-	-	-

Kolejnym etapem weryfikacji było przeprowadzenie symulacji procesu wypełniania wnęki formy zmodyfikowanej próby Ruff z zastosowaniem danych materiałowych uzyskanych w badaniach laboratoryjnych i parametrów procesu z wytopów eksperymentalnych. Wynik obliczeń przedstawiony został na rysunku 7.6.4., w formie rozkładu prędkości metalu w chwili ustania przepływu w kanałach wnęki formy, istotny jest stopnień wypełnienia wnęki formy, który jest daleki od rzeczywistego.

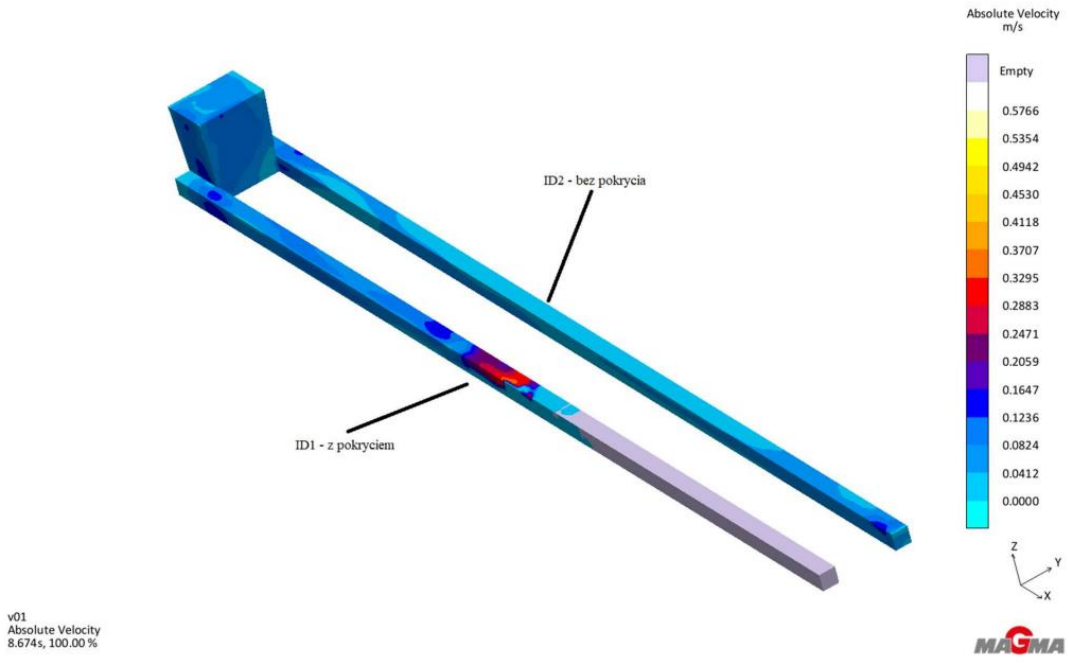


Rys. 7.6.4. Wynik symulacji dla zaimplementowanych danych przepuszczalności

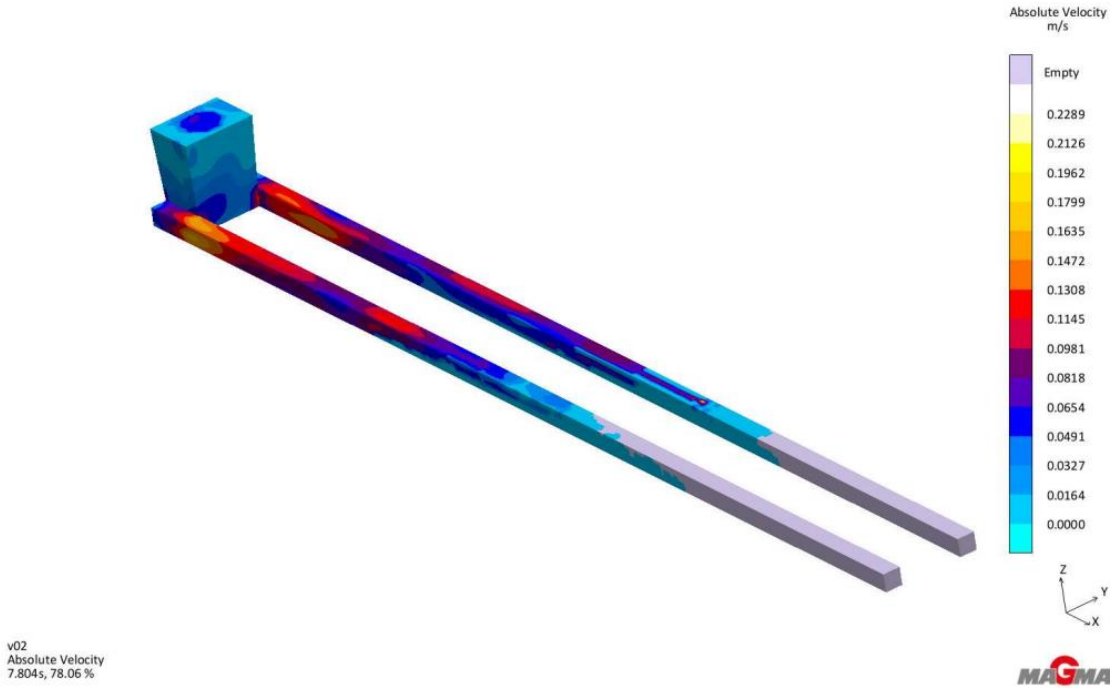
Uzyskanie wyniku dalekiego od wyniku eksperymentu rzeczywistego wymusiło przeprowadzenie iteracyjnego procesu weryfikacji danych materiałowych ze szczególnym uwzględnieniem przepuszczalności masy formierskiej. Parametrem zmiennym w obliczeniach symulacjach było objętościowe natężenie przepływu gazu, jako parametr charakteryzujący przepuszczalność wirtualnej formy. Dla masy formierskiej zastosowanej dla modelu z pokryciem ogniotrwałym przyjęto oznaczenie ID1, natomiast dla masy formierskiej zastosowanej dla modelu bez pokrycia zastosowano oznaczenie ID2. Zastosowane w symulacjach wartości objętościowego natężenia przepływu gazu przedstawiono w tabeli 7.6.2. Wyniki symulacji w analogicznej jak na rysunku 7.6.4. przedstawione zostały na rysunkach 7.6.5.-7.6.14.

Tabela 7.6.2. Zestawienie wartości objętościowego natężenia przepływu zastosowanych w symulacjach

Wersja symulacji		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Objętościowe natężenie przepływu [cm^3/min]	ID1	0,10	0,07	0,01	0,001	0,02	0,05	0,06	0,069	0,059	0,048
	ID2	1,85	0,10	0,01	0,010	0,05	0,01	0,10	0,100	0,090	0,080

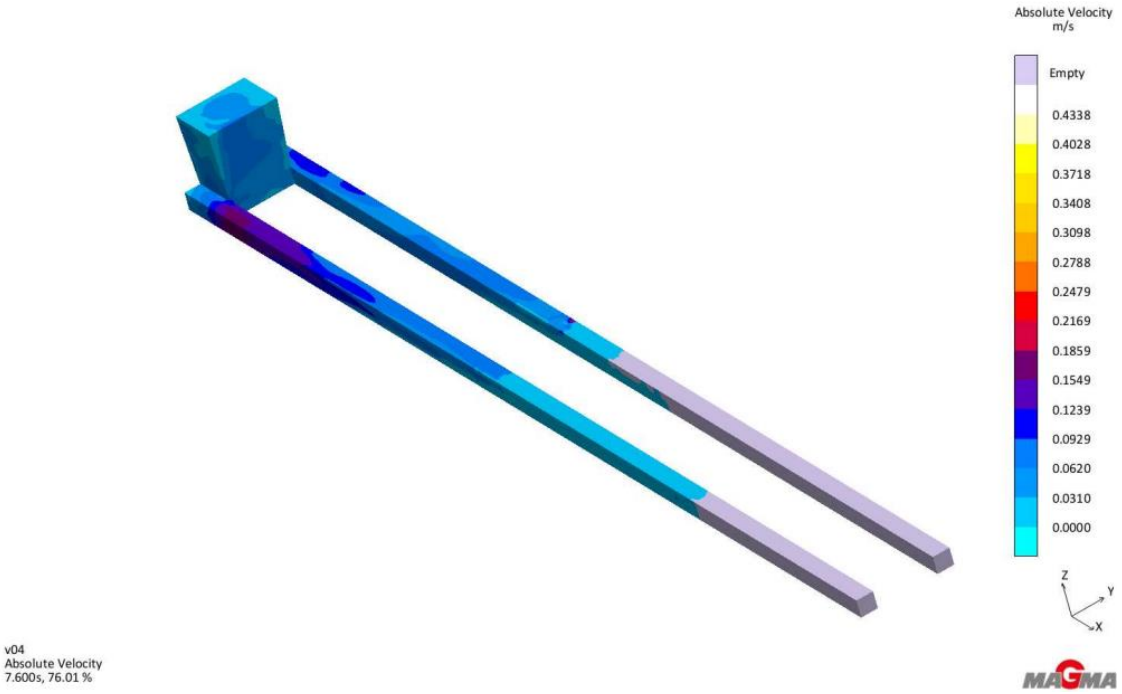


Rys. 7.6.5. Wynik symulacji V1

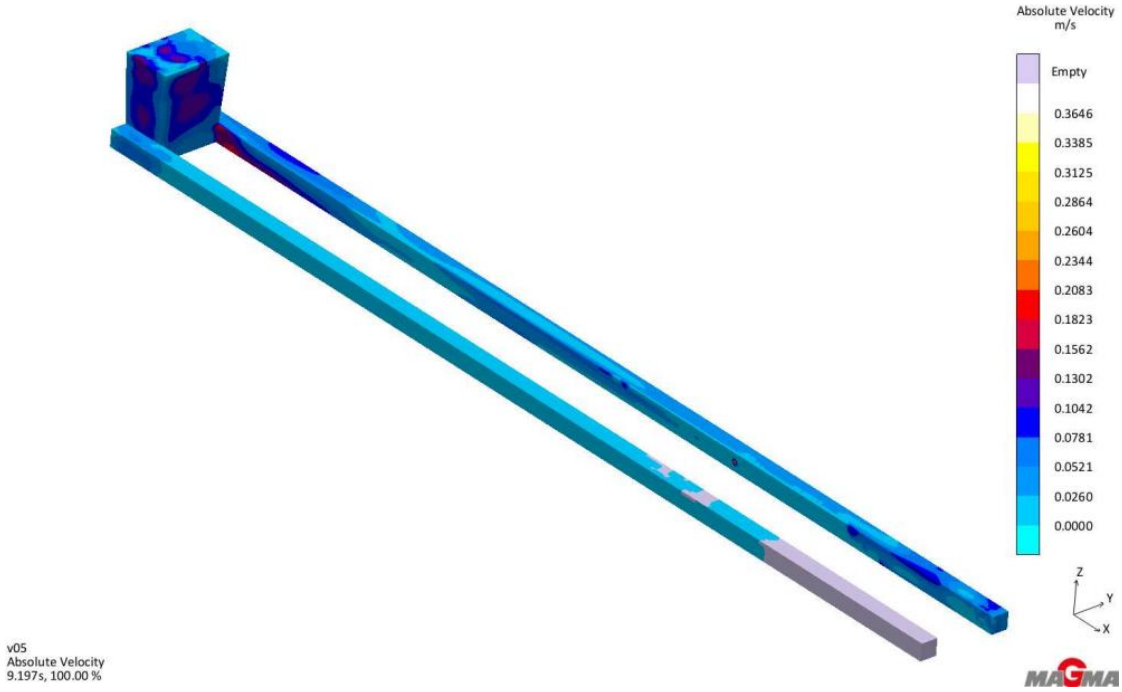


Rys.7.6.6 Wynik symulacji V2

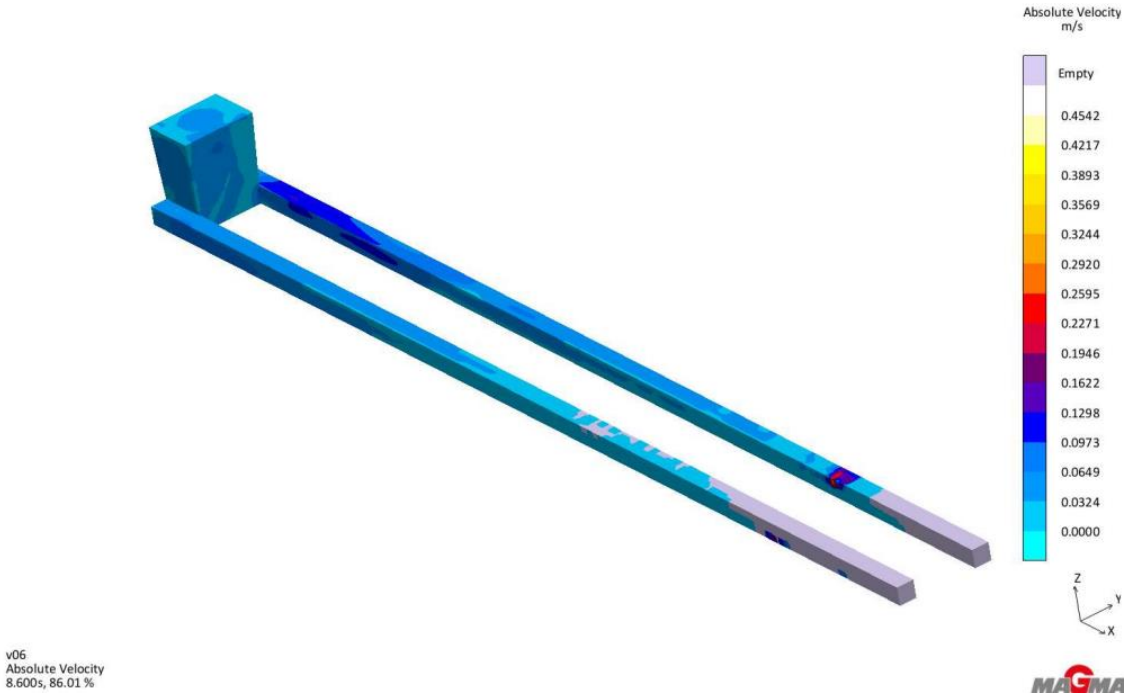
Rys. 7.6.7. Wynik symulacji V3



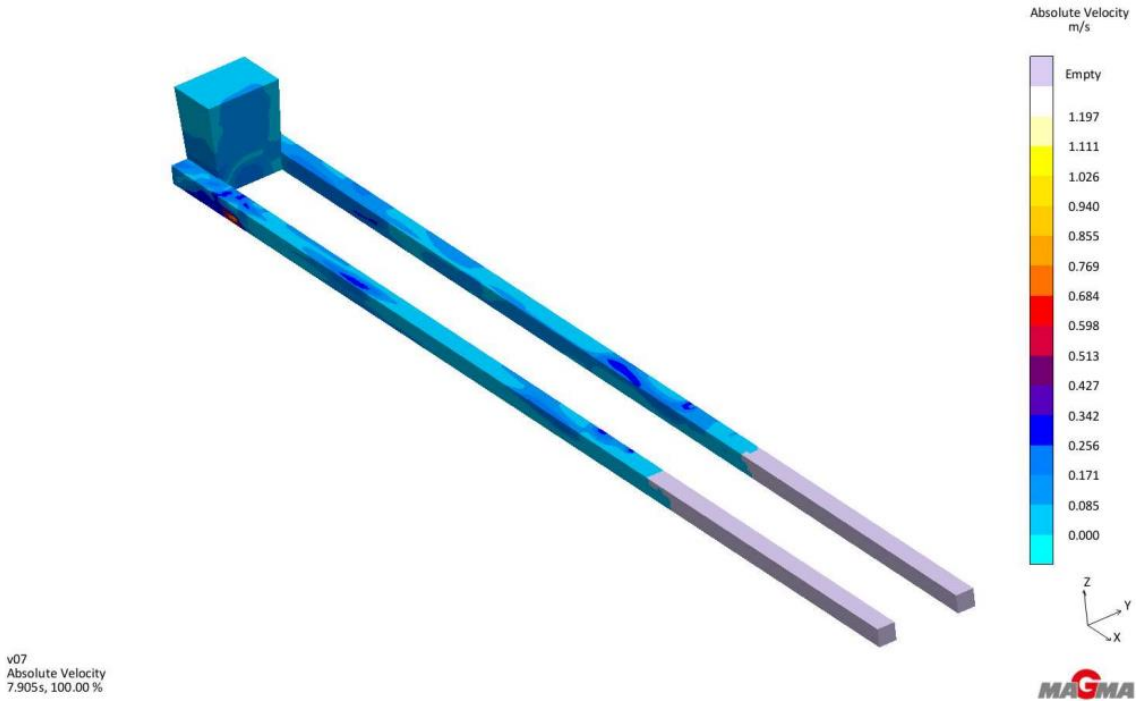
Rys. 7.6.8. Wynik symulacji V4



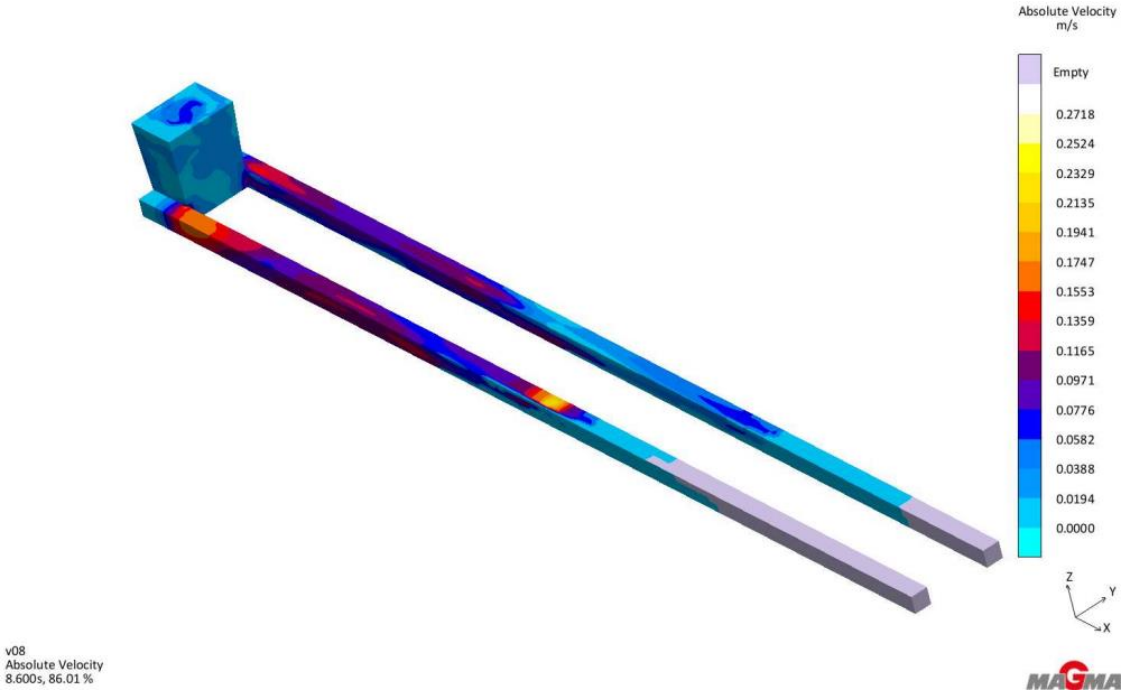
Rys. 7.6.9. Wynik symulacji V5



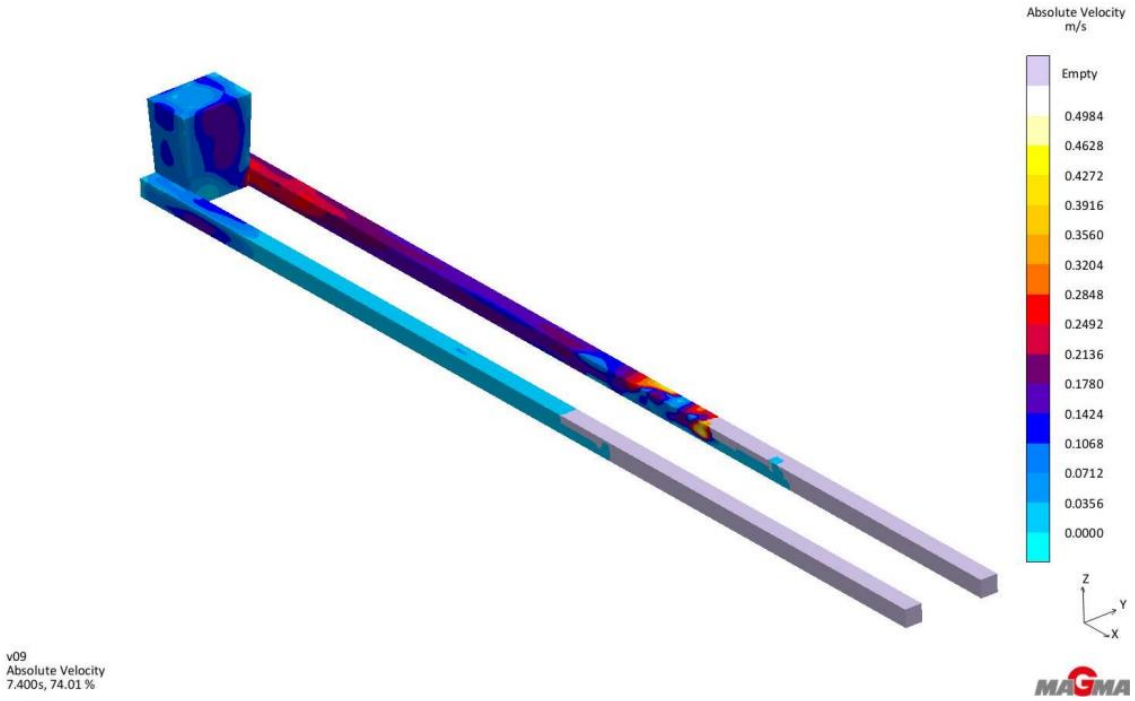
Rys. 7.6.10. Wynik symulacji V6



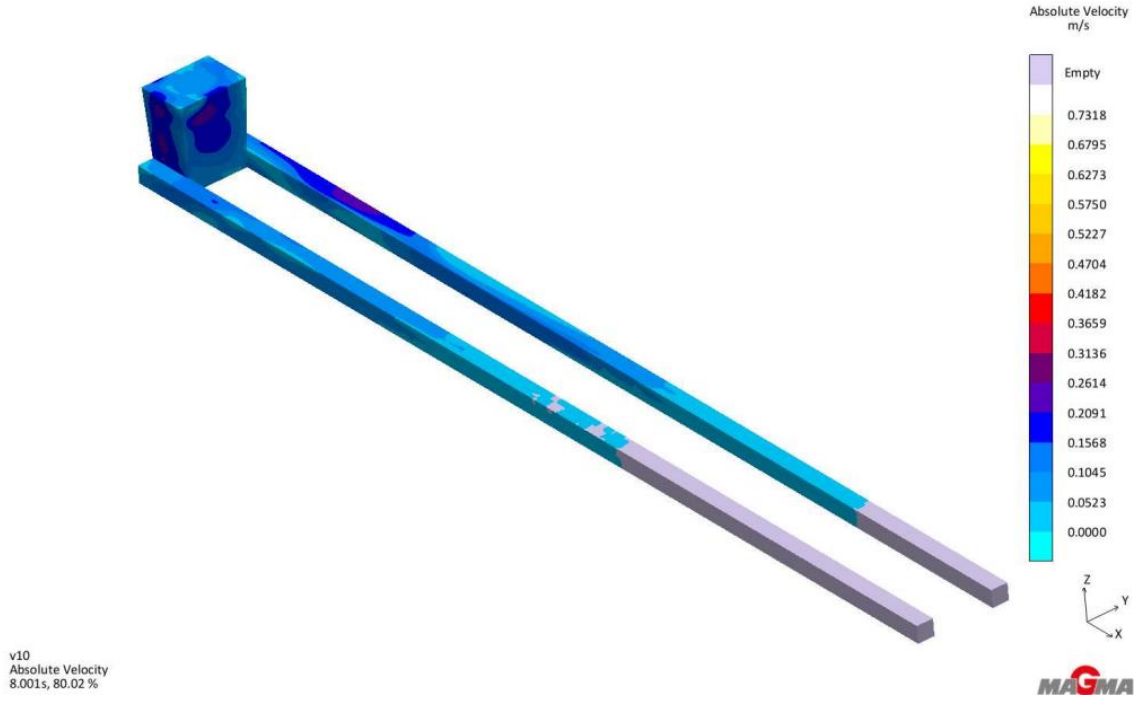
Rys. 7.6.11. Wynik symulacji V7



Rys. 7.6.12. Wynik symulacji V8



Rys. 7.6.13. Wynik symulacji V9



Rys. 7.6.14 Wynik symulacji V10

7.7. WPŁYW ZALEŻNOŚCI POLA POWIERZCHNI DO OBJĘTOŚCI MODELU NA PROCES WYPEŁNIANIA FORMY

Zestawienie czasów wypełniania formy określonych w symulacji i w wykonaniu odlewów rzeczywistych dla modeli laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 7.7.1. Natomiast dla modeli quasi-przemysłowych czasy te wypełniania zostały przedstawione w tabeli 7.7.2. Są to wartości obrazujące czas dotarcia metalu do poszczególnych punktów pomiarowych mierzone od chwili rozpoczęcia zalewania.

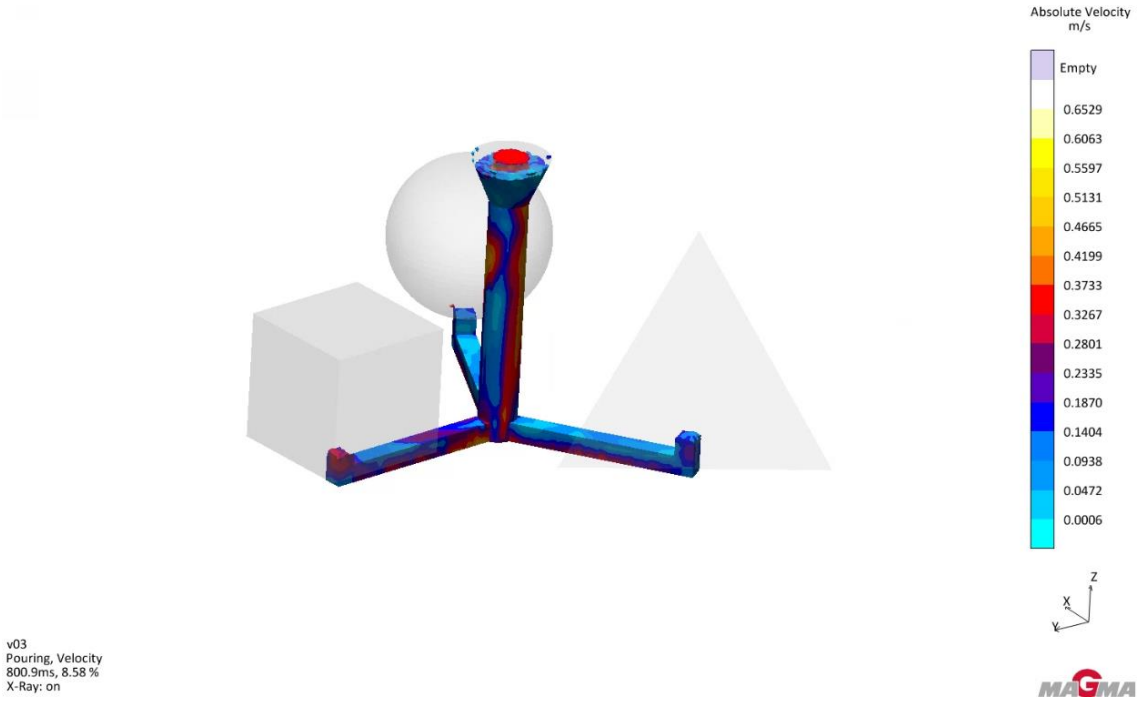
Tabela 7.7.1. Zestawienie czasów wypełniania wnęki formy dla symulacji i rzeczywistych prób laboratoryjnych

Badania laboratoryjne							
	Symulacja komputerowa					Próby rzeczywiste	
Model	Wersja 1	Wersja 2	Wersja 3	Wersja 4	Wersja 5	Pokrycie szare	Pokrycie brązowe
Kula wejście	0,7 s	0,7 s	0,7 s	10,7 s	11,1 s	2 s	1s
Sześcian wejście	0,8 s	0,8 s	0,8 s	10,7 s	10,9 s	2 s	3 s
Czworościan wejście	0,7 s	0,7 s	0,7 s	10,7 s	10,9 s	2 s	3 s
Kula środek	9 s	9 s	12,4 s	13,9 s	14,3 s	15 s	8 s
Sześcian środek	7,4 s	7,6 s	11,8 s	14,1 s	14 s	20 s	11 s
Czworościan środek	10,6 s	10,6 s	14,1 s	16,1 s	15,6 s	23 s	11 s
Kula szczyt	20 s	20 s	30,5 s	15,5 s	17,1 s	44 s	24 s
Sześcian szczyt	19,6 s	19,6 s	30,2 s	16,6 s	16,9 s	44 s	16 s
Czworościan szczyt	15,3 s	15,3 s	19,6 s	16,9 s	16,4 s	(45-50 s) niedolew	22 s

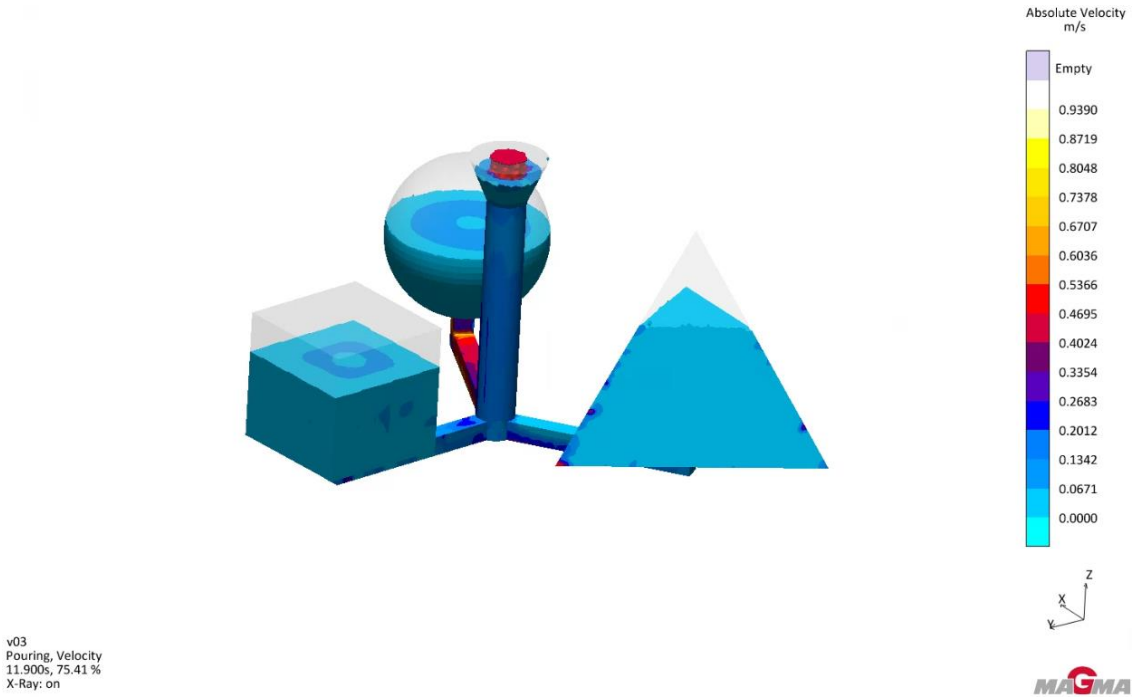
Tabela 7.7.2. Zestawienie czasów wypełniania wnęki formy dla symulacji i wytopów rzeczywistych quasi-przemysłowych

Badania quasi-przemysłowe						
	Symulacja komputerowa					Próby rzeczywiste
Punkt pomiarowy	Wersja 1	Wersja 2	Wersja 3	Wersja 4	Wersja 5	Pokrycie brązowe
Model 1						
1	10,31 s	10,26 s	10,26 s	0,67 s	10,57 s	5 s
2	10,75 s	10,7 s	10,7 s	1,75 s	10,79 s	8 s
3	17,06 s	17,67 s	17,67 s	10,33 s	19,06 s	23 s
4	17,06 s	17,88 s	17,88 s	9,64 s	19,06 s	23 s
5	20,32 s	20,45 s	20,45 s	18,64 s	20,76 s	32 s
Model 2						
1	10,31 s	10,26 s	10,26 s	0,67 s	10,57 s	5 s
2	11,4 s	11,35 s	11,35 s	2,39 s	11,23 s	10 s
3	15,1 s	15,27 s	15,27 s	7,12 s	15,14 s	17 s
4	14,89 s	15,27 s	15,27 s	7,12 s	15,14 s	18 s
5	19,23 s	19,19 s	18,97 s	14,05 s	17,53 s	29 s
Model 3						
1	10,31 s	10,26 s	10,26 s	0,67 s	10,57 s	5 s
2	11,62 s	11,35 s	11,35 s	2,58 s	11,23 s	10 s
3	14,01 s	13,96 s	13,96 s	5,94 s	13,84 s	16 s
4	14,45 s	13,96 s	13,96 s	5,65 s	13,84 s	17 s
5	17,71 s	17,01 s	16,57 s	10,68 s	15,36 s	22 s

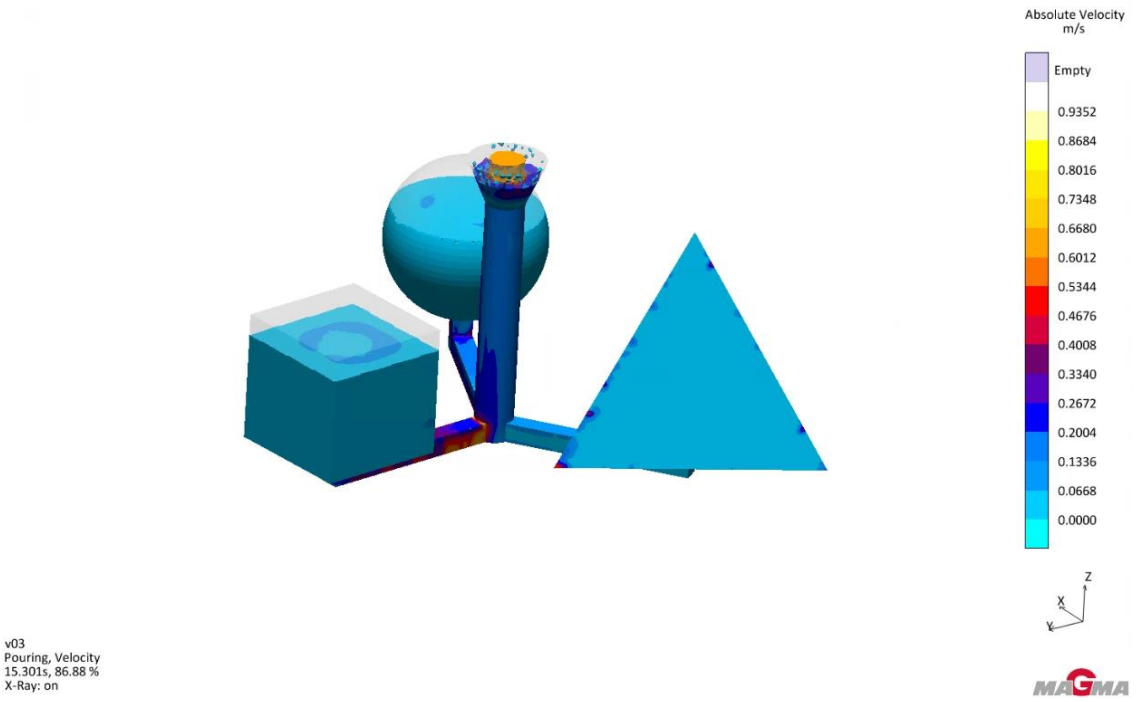
Wybrane wynik symulacji zalewania, z widocznymi różnicami w wypełnianiu, dla wersji symulacji nr 3 modeli laboratoryjnych przedstawiono na rysunkach 7.7.1-7.7.3.



Rys. 7.7.1. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 8,58% procesu wypełnienia

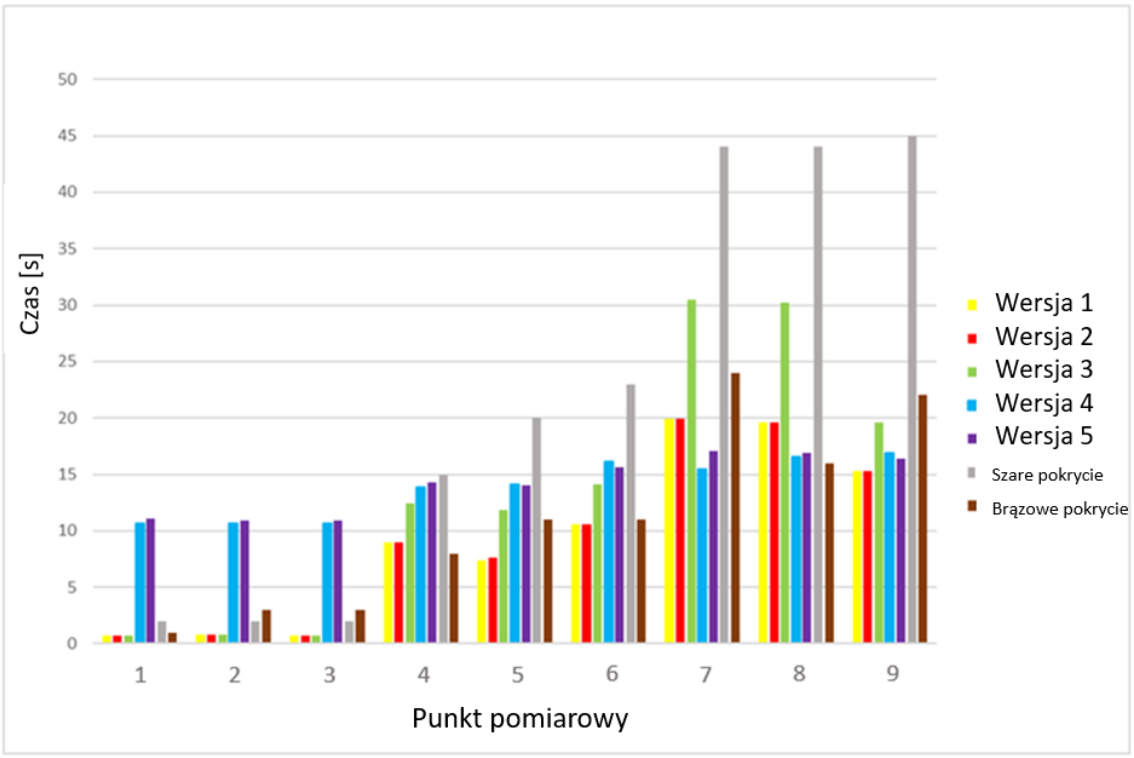


Rys.7.7.2. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 75,41% procesu wypełnienia



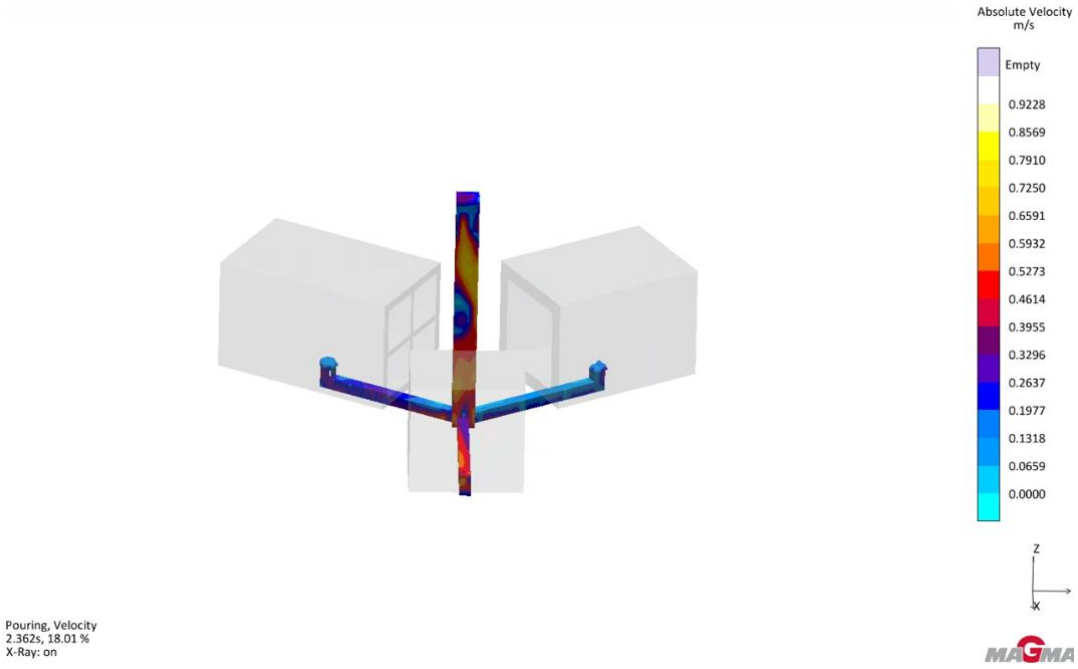
Rys. 7.7.3. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 86,8% procesu wypełnienia

Graficzne zestawienie czasów symulowanego i rzeczywistego wypełniania formy dla modeli laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 7.7.4. Natomiast dla modeli quasi-przemysłowych czasy wypełnienia przedstawione zostały na rysunku 7.7.8.

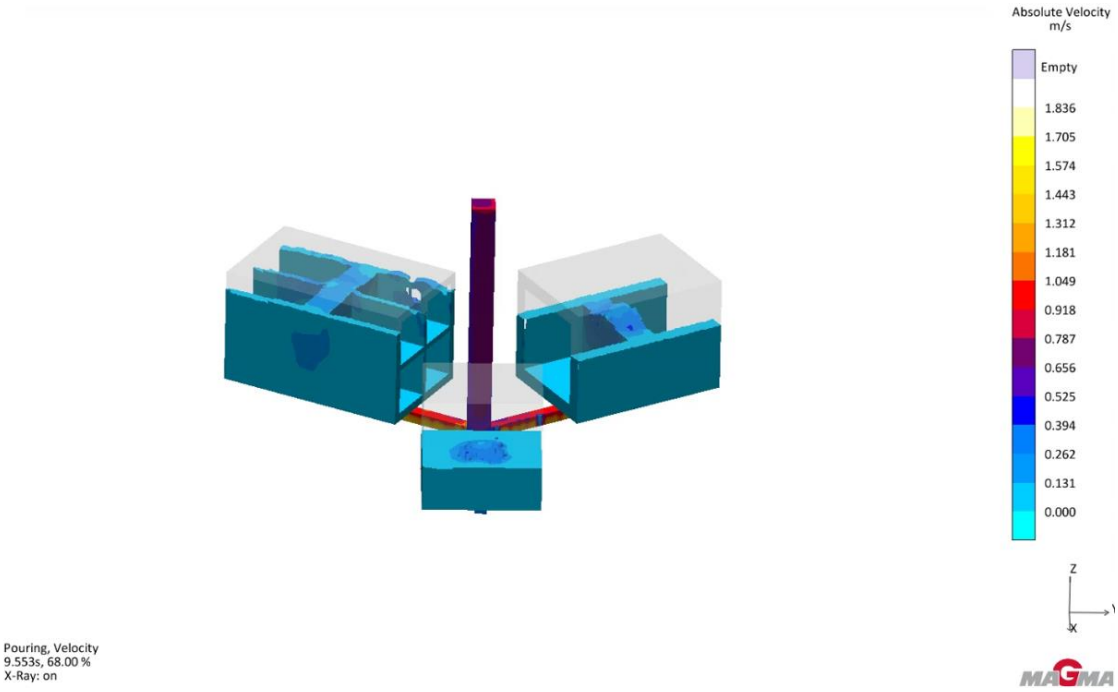


Rys. 7.7.4. Zestawienie czasów dotarcia metalu do punktów pomiarowych dla symulacji i odlewów rzeczywistych modele laboratoryjne

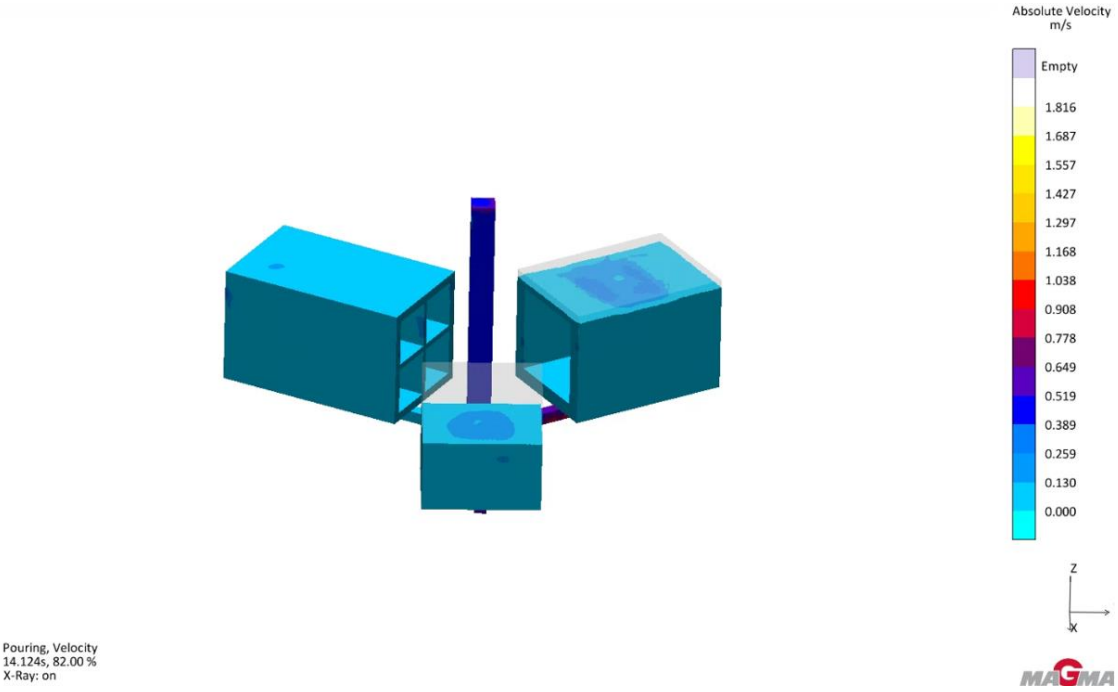
Wybrane wynik symulacji zalewania, z widocznymi różnicami w wypełnianiu, dla wersji symulacji nr 1 modeli quasi-przemysłowych przedstawiono na rysunkach 7.7.5.-7.7.7.



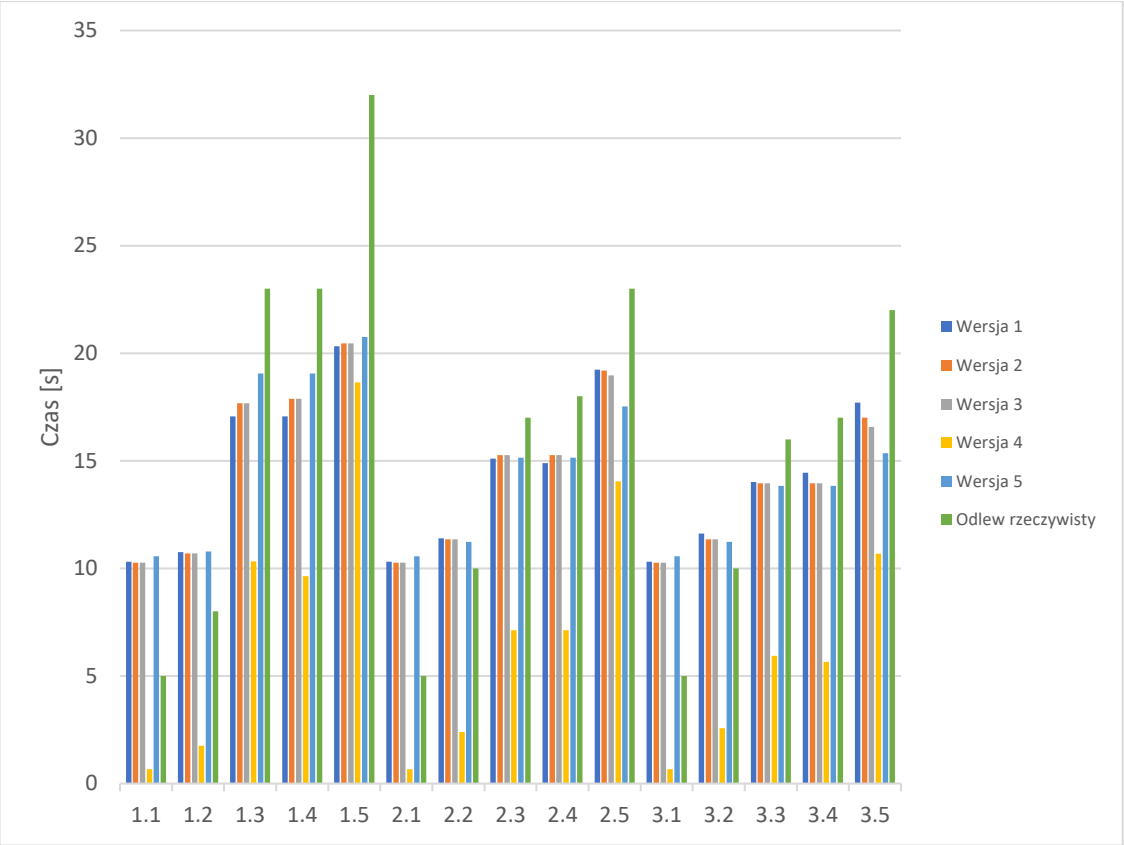
Rys. 7.7.5. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 18,01% procesu wypełnienia



Rys. 7.7.6. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 68,00% procesu wypełnienia



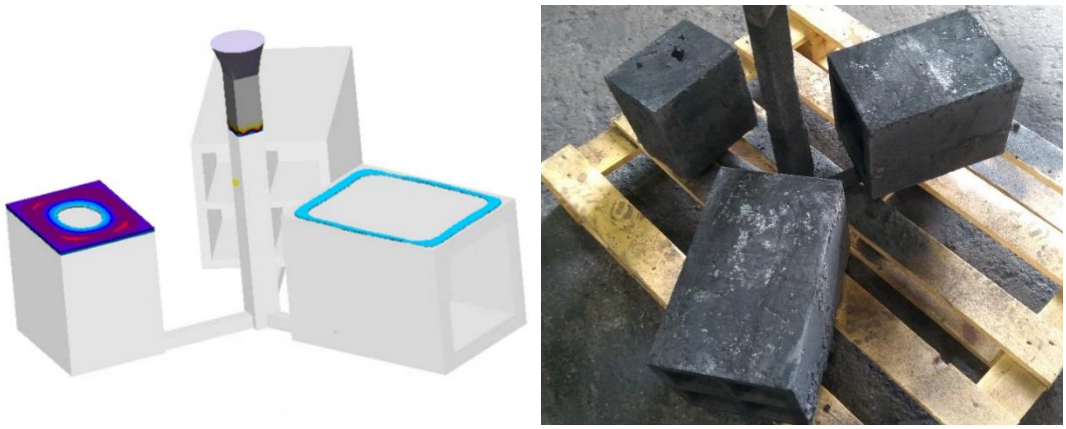
Rys. 7.7.7. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 82,00% procesu wypełnienia



Rys. 7.7.8. Zestawienie czasów dotarcia metalu do punktów pomiarowych dla symulacji i odlewów rzeczywistych modele quasi-przemysłowe

Na rysunkach 7.7.9.-7.7.10. zamieszczone zostały zdjęcia odlewów rzeczywistych i obrazy rozkładu prognozowanych w symulacji wad skurczowych w odlewach dla modeli laboratoryjnych i quasi-przemysłowych. Pomimo sporych różnic pomiędzy symulowanymi i rzeczywistymi czasami wypełniania form umiejscowienie i wielkość wad skurczowych w odlewach rzeczywistych niemal dokładnie odpowiada prognozowanym na podstawie komputerowej procesów zalewania i krzepnięcia.

Rys.7.7.9. Porównanie wad modeli laboratoryjnych powstałych w symulacji i rzeczywistości



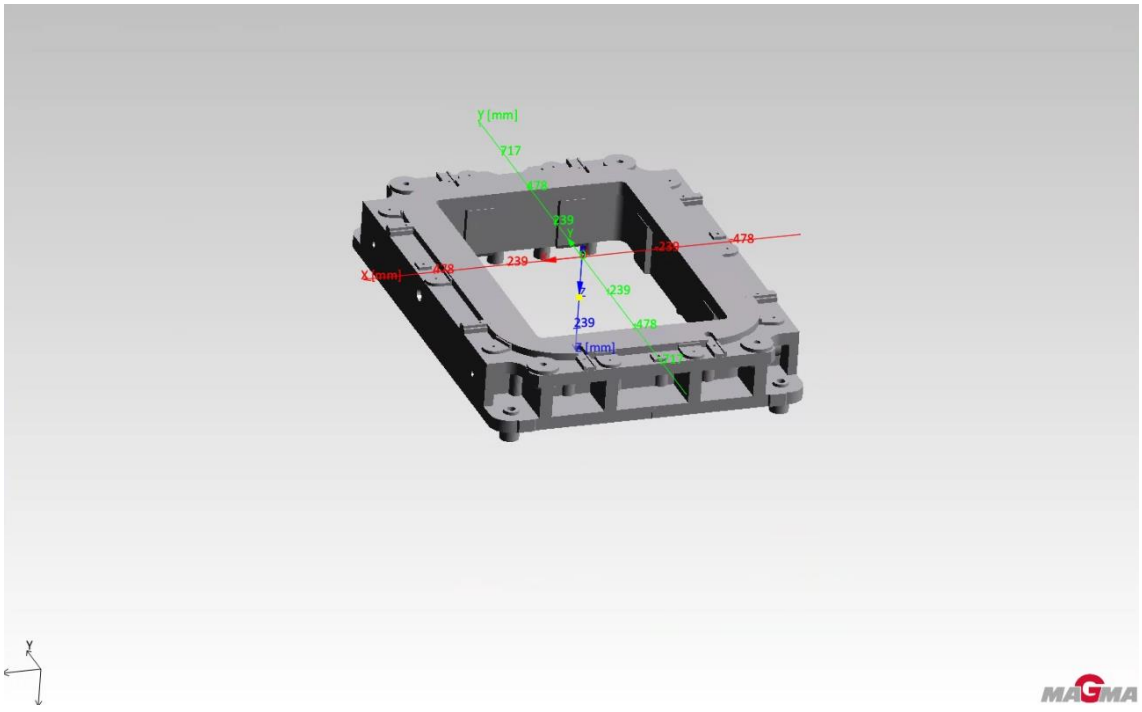
Rys. 7.7.10 Porównanie wad modeli quasi-przemysłowych powstałych w symulacji i rzeczywistości

8. SYMULACJE PRZEMYSŁOWE

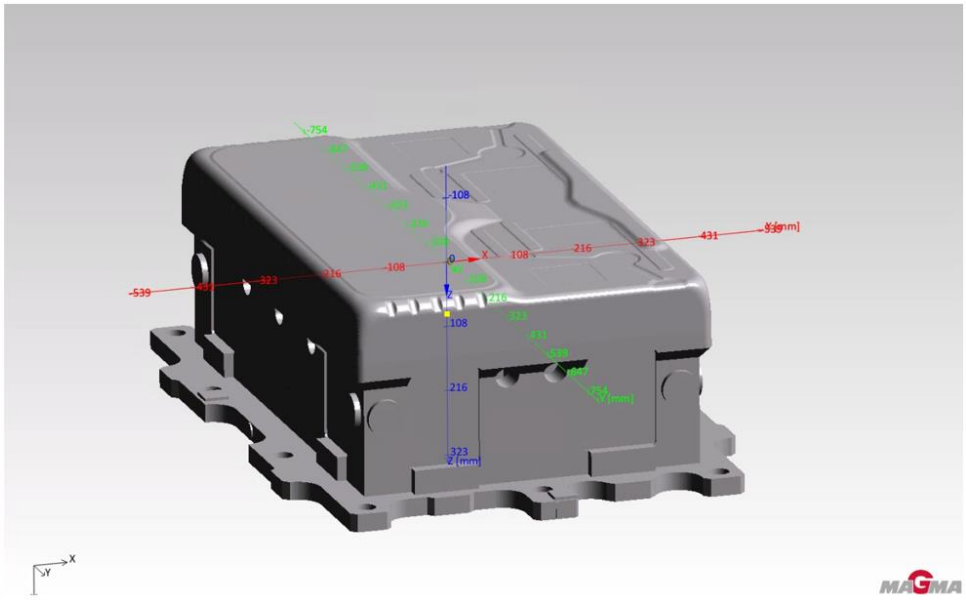
Po opracowaniu metodyki implementacji danych laboratoryjnych w programach symulacyjnych oraz walidacji uzyskanych wyników przeprowadzono próbę wdrożenia opracowanej techniki w warunkach przemysłowych. W tym celu wybrane zostały cztery typowe dla Odlewni Rafamet odlewy przemysłowe wykonywane w technologii pełnej formy. W trakcie procesu odlewania wytypowanych odlewów za pomocą czujników umieszczonych w formie mierzono czasy wypełniania wnęki formy. Symulacje komputerowe odlewania każdego z odlewów zostały przeprowadzone w dwóch cyklach. W pierwszym cyklu dane materiałowe i parametry procesu stanowiły domyślne ustawienia programu MagmaSoft dla procesu pełnej formy (symulacja automatyczna), natomiast w drugim cyklu użyto danych uzyskanych z wykorzystaniem metodyki opracowanej w ramach niniejszej pracy oraz parametrów procesu rzeczywistego udostępnionych przez Odlewnię Rafamet tylko na potrzeby realizacji tych badań (symulacja parametryzowana). Materiał odlewu we wszystkich przypadkach to żeliwo sferoidalne, natomiast materiał modelu to EPS. Geometria wybranych modeli / odlewów przedstawiona została na rys. 8.1.-8.4. W tabeli 8.1. zestawione zostały: masa odlewów, rzeczywiste czasy wypełniania zmierzone podczas zalewania odlewów w warunkach przemysłowych, ze względu na wrażliwość tych danych rzeczywisty czas zalewania podany został w procentach jako wartość odniesienia, procentowa różnica czasu wypełniania dla domyślnych danych i czasu rzeczywistego, procentowa różnica czasu wypełniania dla zaimplementowanych zwalidowanych danych opracowanych na podstawie badań laboratoryjnych i czasu rzeczywistego. Dodatkowo w tabeli 8.1. podano wartość stosunku pola powierzchni do objętości dla analizowanych odlewów.

Tabela 8.1. Zestawienie danych dla procesów rzeczywistego i symulowanego zalewania analizowanych odlewów

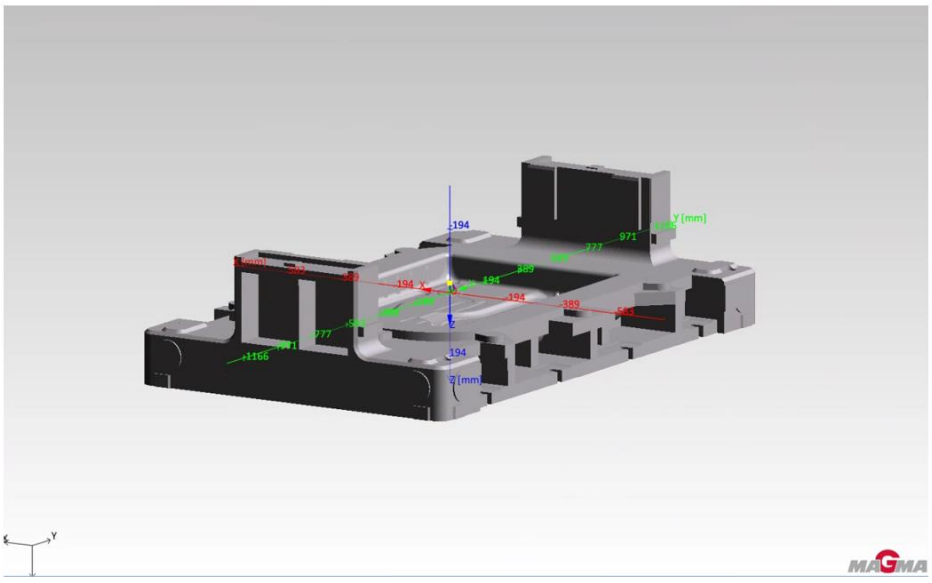
Odlew nr	Masa odlewu [kg]	Czas rzeczywisty [%]	Symulacja automatyczna [%]	Symulacja parametryzowana [%]	Stosunek Pole pow./ Objętości
1	800	100	-44,2	-4,2	48,0
2	815	100	-35,0	12,3	46,2
3	1380	100	-37,0	-16,0	45,3
4	1490	100	-16,4	25,7	53,6



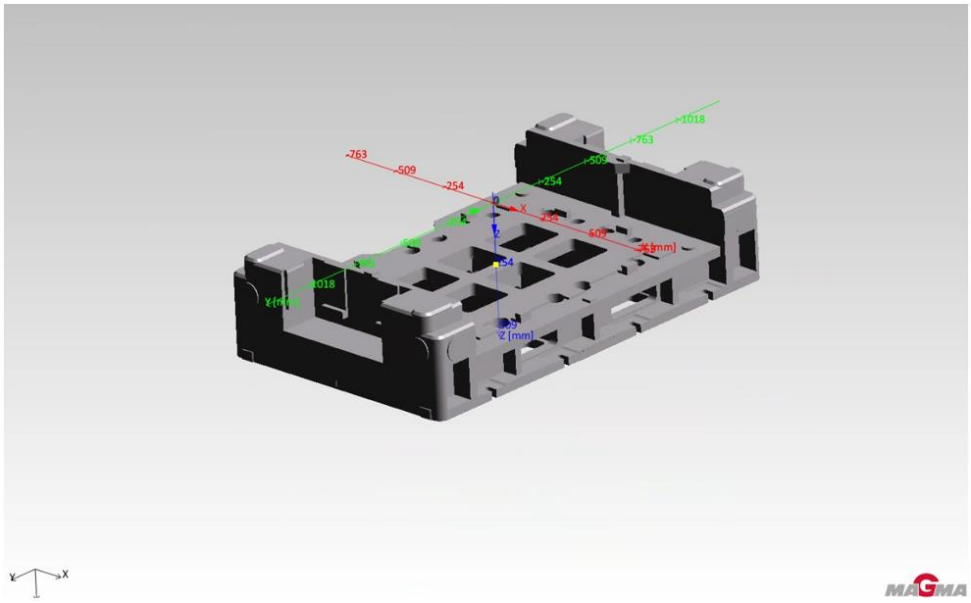
Rys. 8.1. Geometria modelu nr 1



Rys. 8.2. Geometria modelu nr 2

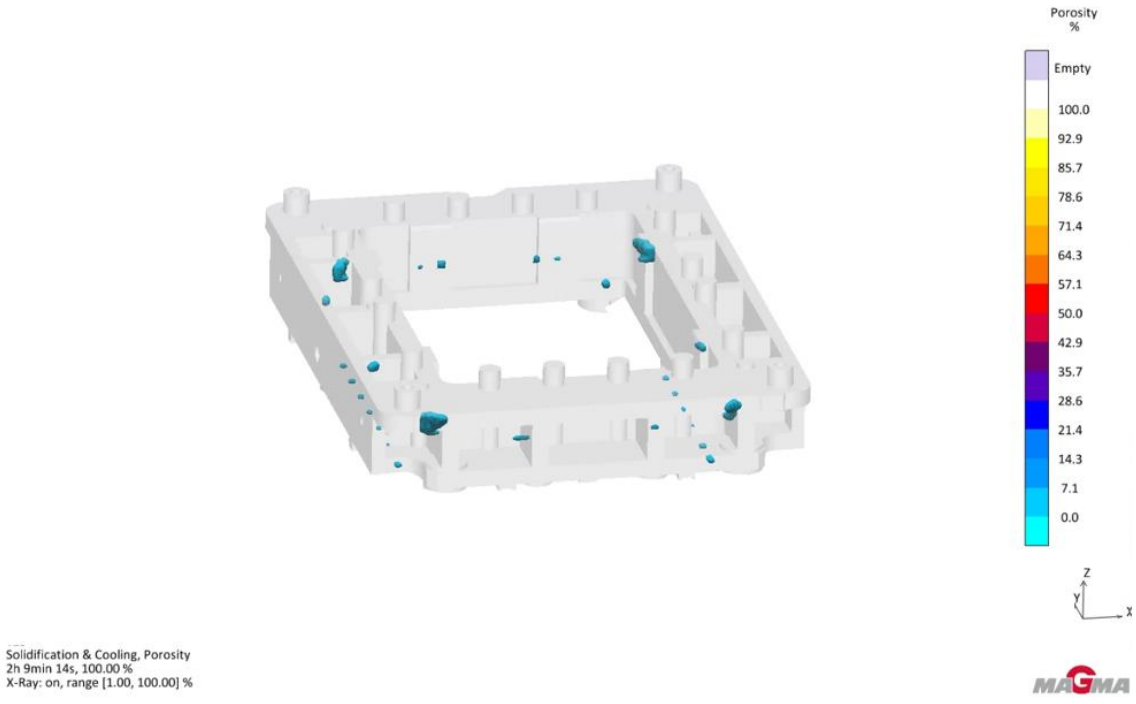


Rys. 8.3. Geometria odlewu nr 3



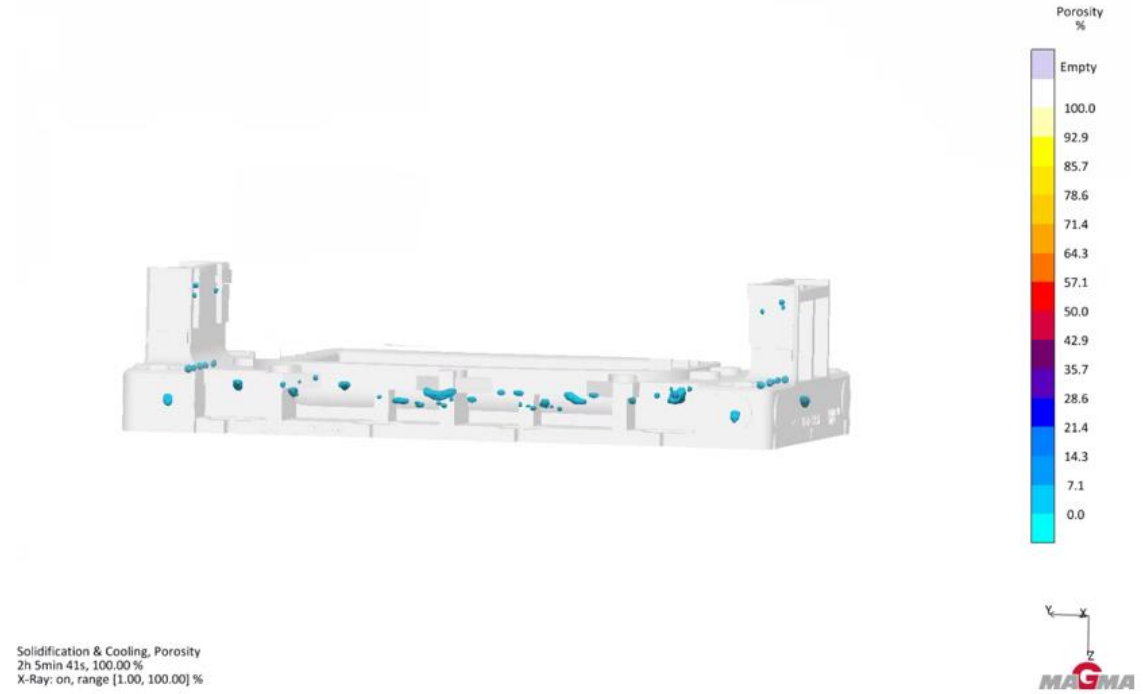
Rys. 8.4. Geometria odlewu nr 4

Wyniki symulacji były weryfikowane ze względu na wielkość porowatości wewnętrznych w odlewach, co stanowiło jakościowe kryterium porównawcze otrzymanych wyników obliczeń z odlewami rzeczywistymi. Rozkład porowatości wewnętrznych został przedstawiony na rys. 8.5.-8.8. dla dlewów kolejno 1-4.

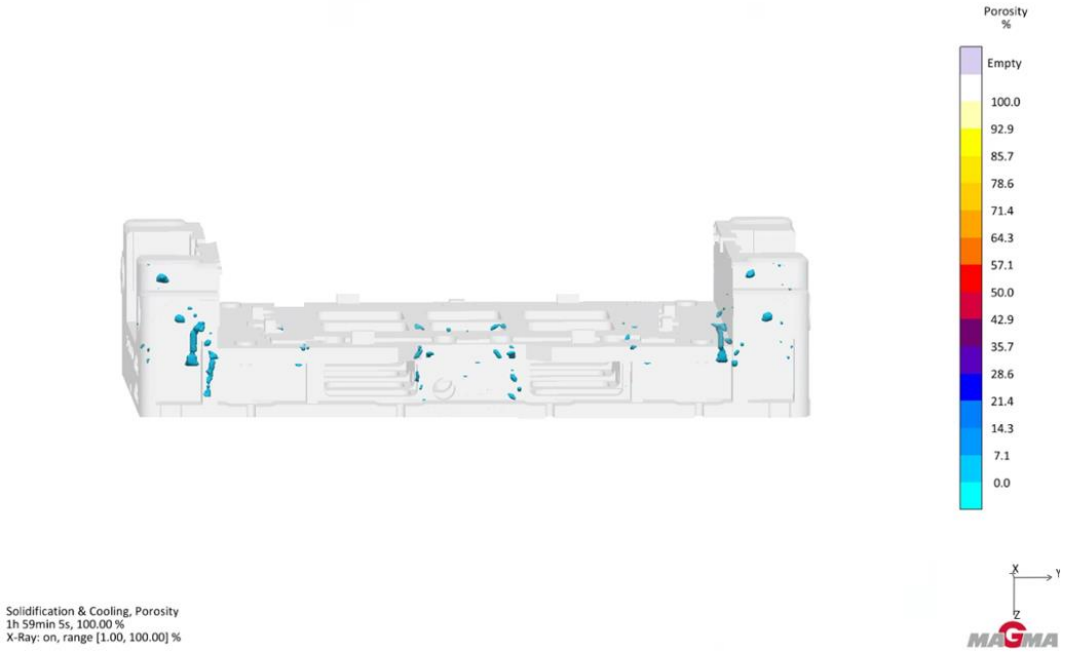


Rys. 8.5. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 1

Rys. 8.6. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 2



Rys. 8.7. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 3



Rys. 8.8. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 4

Analiza otrzymanych wyników symulacji, jednoznacznie wskazuje różnice w czasach wypełniania formy na korzyść wyników obliczeń w oparciu o dane pozyskane z wykorzystaniem opracowanej metodyki. Dla wszystkich czterech odlewów, w pierwszym cyklu symulacji, uzyskano znacząco krótsze (wartości ujemne) czasy wypełniania w porównaniu do czasów rzeczywistych procesu, które stanowiły wartość odniesienia. W drugim cyklu różnice w czasie wypełniania rzeczywistej formy i wirtualnej dla odlewów 1-3 są istotnie mniejsze co świadczy o porównywalnych wartościach rzeczywistego i symulowanego czasu wypełniania. Jedynie w przypadku odlewu nr 4 różnica ta jest większa niż w cyklu pierwszym dodatkowo z przeciwnym znakiem. Podobnie dla odlewu nr 3 symulowany czas wypełniania był dłuższy od rzeczywistego.

Otrzymane wyniki potwierdzają słuszność postawionej tezy, że wiele czynników technologicznych wpływa na proces wypełniania formy. Programy symulacyjne choć ciągle doskonalone, to w przypadku procesu pełnej formy, w oparciu o dane własne, generują wyniki dalekie od rzeczywistości. Jedynie implementacja odpowiednio zweryfikowanych danych laboratoryjnych pozwala uzyskiwać wyniki symulacji zbliżone do rzeczywistego procesu.

Przedstawiona praca zatem ma wysoki potencjał wdrożeniowy w zakresie metodyki badawczej, która pozwala zwiększyć efektywność wspomaganego komputerowo projektowania technologii odlewania metodą Lost Foam / Full Mold.

9. ANALIZA WYNIKÓW I SPOSTRZEŻENIA

Obserwowane zjawiska zachodzące w formie odlewniczej w czasie zalewania pustej wnęki formy należą do skomplikowanych, ze względu na wpływ wielu czynników. Mechanizmy i zjawiska towarzyszące wypełnianiu wnęki formy przez ciekły metal, stanowią temat rozważań wielu badaczy. W metodzie pełnej formy rozważamy odmienne warunki, ponieważ należy uwzględnić dodatkowo proces spalania modelu jednorazowego. Rodzaj materiału i geometria modelu wpływa na ilość i ewakuację produktów gazowych, które są generowane w czasie spalania modelu, co w konsekwencji prowadzi do wpływu przede wszystkim na proces wypełniania formy, powodując zmniejszenie lejności i wyraźnie wydłużając czas zalewania.

Jednym z celów pracy doktorskiej było określenie ilości gazów generowanych podczas pirolizy jednorazowego modelu co doprowadziło do opracowania koncepcji stanowiska do zgazowania materiałów na jednorazowe modele odlewnicze. Wykonane stanowisko pozwoliło z powodzeniem przeprowadzić analizę wybranych materiałów pod kątem ich potencjału wykorzystania na modele jednorazowe. Opracowane prototypowe stanowisko dało możliwość analizy ilościowej gazów powstających podczas zgazowania modelu jednorazowego w czasie zalewania form w metodzie pełnej formy czyli pozyskiwania danych niezbędnych do symulacji komputerowej procesu wypełniania wnęki formy.

W badaniach testowych stanowiska do zgazowania materiałów na jednorazowe modele odlewnicze, odnotowany został wzrost ciśnienia w komorze spalania dla zgazowania wszystkich badanych materiałów, jak również dla nagrzewania pustej komory spalania. Różnice w przebiegu krzywych, odpowiadających ciśnieniu dla nagrzewania komory spalania wraz z próbką w porównaniu do nagrzewania pustej komory spalania, wynikają z faktu pojawienia się w komorze pomiarowej gazów z pirolizy próbek polistyrenowych. Dzięki tej analizie możliwe jest oszacowanie ilości gazów generowanych w trakcie zalewania formy w technologii pełnej formy.

Obliczone pole powierzchni pomiędzy krzywą dla nagrzewania pustej komory spalania i nagrzewania wraz z próbką, jednoznacznie podkreśla różnice w ilości wygenerowanych gazów. Najmniejsza wartość obliczonego pola powierzchni została uzyskana dla próbki o oznaczeniu P_5 i wynosiła 4,73 bar·K. Implementacja ilości produktów zgazowania materiału modelu w programie symulacyjnym możliwa jest

w formie danych termofizycznych materiału, a symulowana zmiana objętości i co za tym idzie ciśnienia w objętości skończonej odbywa się na podstawie zdefiniowanej dla materiału charakterystyki zmian gęstości w temperaturze. Na podstawie wartości pola powierzchni będącej bezpośrednim wynikiem badania na opracowanym stanowisku w prosty sposób można obliczyć gęstość produktów zgazowania modelu, którą to wartość bezpośrednio implementujemy w programie symulacyjnym.

Gęstość materiału w stanie spienionym na modele jednorazowe nie ma zauważalnego wpływu na przebieg krzywych zmian ciśnienia w funkcji temperatury, jednakże wyższe ciśnienia wystąpiły w przypadku próbek materiału o większej gęstości.

Największe różnice ciśnienia, w nagrzewaniu komory pomiarowej z próbką w porównaniu do komory pustej, odnotowane zostały dla próbek klejonych. Warstwa kleju wpływa znacząco na zwiększenie ilości gazów powstałych w trakcie gazyfikacji, co naturalnie spowodowane jest większą masą materiału ulegającego zgazowaniu. Dla próbek bez kleju obliczone pole powierzchni było ponad dwukrotnie mniejsze w porównaniu do pola powierzchni dla próbek klejonych. Dla takich modeli (klejonych) ilość generowanych gazów będzie zdecydowanie większa. W wielu przypadkach ilość produktów rozkładu termicznego modeli jednorazowych jest pomijany w czasie projektowania technologii formy, co niewątpliwie jest dużym błędem. Zbadane zależności mogą być zatem punktem odniesienia do optymalizacji technologii pełnej formy. Produkcja modeli jednorazowych powinna być ukierunkowana na wytwarzanie modeli w możliwie jak najmniejszej liczbie części, a tym samym na zmniejszenie ilości powierzchni klejonych. W wielu przypadkach jest to uwarunkowane wieloma czynnikami, natomiast dla odlewnictwa wielkogabarytowego ma to bardzo istotne znaczenie.

W symulacji komputerowej odlewania w technologii pełnej formy niezwykle istotne jest poprawne zdefiniowanie ilości produktów zgazowania jednorazowego modelu. Ma to zasadniczy wpływ na poprawność wyników obliczeń, przyjęcie niepoprawnych wartości może zwielokrotnić rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji a procesem rzeczywistym, szczególnie etapu wypełniania wnęki formy. Dlatego konieczne jest wyznaczanie ilości produktów zgazowania modelu każdorazowo dla danego materiału i stosowanego kleju.

Przeprowadzone badania i analizę uzyskanych wyników podsumować można następującymi spostrzeżeniami:

- w symulacji procesu technologii pełnej formy niezwykle istotne są precyzyjne dane dotyczące ilości gazów i kinetyki procesu zgazowania modelu z polistyrenu spienionego,

- na potrzeby szybkiego określania ilości produktów zgazowania modelu jednorazowego opracowana została koncepcja i wykonany prototyp stanowiska pomiarowego, a wykonane symulacje i testy potwierdziły poprawność założeń koncepcyjnych,

- wyniki badań przeprowadzonych na zbudowanym prototypowym stanowisku do określania ilości produktów zgazowania modelu jednorazowego wskazują na możliwość stosunkowo precyzyjnego określenia ilości produktów pirolizy materiału modelu i ich prostą implementację w programach symulacyjnych,

- znaczące różnice w zarejestrowanym ciśnieniu dla nagrzewania próbek klejonych w porównaniu do „czystych” stanowią istotną wiedzę w kontekście zgazowania modeli jednorazowych co ma niewątpliwy wpływ na kinetykę wypełniania form w metodzie pełnej formy.

Badania zasadnicze alternatywnych spienionych materiałów na jednorazowe modele odlewnicze wykazały duże zróżnicowanie wartości ciśnienia w trakcie nagrzewania komory spalania dla cykli bez i z próbką. Wynika to z różnych gęstości badanych materiałów, co w konsekwencji przekładało się na różną masę badanych próbek przy zachowaniu takich samych wymiarów próbki.

Obecnie stosowany przez odlewnię Rafamet EPS VFG 18 uplasował się na trzecim miejscu pod względem ilości wygenerowanych gazów, w czasie badania na opracowanym stanowisku do zgazowania. Wynik ten jest akceptowalny i porównywalny do takich materiałów jak EPS 70 i EPP. Dodatkowo materiał EPS VFG 18 odznacza się najkorzystniejszym składem chemicznym, podatnością na obróbkę mechaniczną, dostępnością i ceną w porównaniu do pozostałych badanych materiałów.

Wartości obliczonego pola powierzchni, pomiędzy krzywą dla nagrzewania pustej komory spalania i nagrzewania wraz z próbką, dla materiałów użytych w badaniach

zasadniczych były znacząco zróżnicowane. Największe pole powierzchni odnotowano dla materiału XPS, którego wartość wynosiła 13,46 bar·K, gęstość produktów zgazowania wynosiła 1,2139 kg/m^3. Natomiast najmniejsze pole powierzchni uzyskano dla materiału EPS 70, o wartości 4,21 bar·K, gęstość produktów zgazowania wynosiła 2,2430 kg/m^3.

Z badań i analizy otrzymanych wyników wyciągnięto następujące wstępne spostrzeżenia:

- wzrost ciśnienia i temperatury dla pustej komory spalania przebiega w sposób równomierny. Zarejestrowane dane procesu nagrzewania komory spalania wraz z próbkami materiałów wykazują odmienne charakterystyki krzywych ciśnienia i temperatury, co jest związane z kinetyką rozkładu poszczególnych materiałów,

- materiał XPS wykazał największe zarejestrowane wartości ciśnienia w czasie nagrzewania komory spalania pośród badanych materiałów. Jest to niekorzystna zależność pod kątem ilości negatywnych gazów generowanych z procesu spalania modelu,

- opracowane stanowisko pozwoliło określić różnice ciśnienia dla alternatywnych materiałów na jednorazowe modele odlewnicze w porównaniu do szeroko stosowanego polistyrenu ekspandowanego. Dzięki wykorzystaniu tej metody możliwa jest szybka ocena przydatności materiał spienionego na modele jednorazowe, a odlewnia Rafamet ma możliwość dalszej pracy badawczo rozwojowej w tym kierunku.

Wykonane badania laboratoryjne przepuszczalności masy formierskiej stanowią wstępny etap do walidacji symulacji komputerowej. W założeniach dzięki uzyskanym danym możliwe jest zaimplementowanie odpowiednich wartości przepuszczalności masy formierskiej, w programie MagmaSoft przez co wyniki symulacji powinny być bardziej zbliżone do rezultatów rzeczywistych procesów. Jest to bardzo istotne pod kątem ilości produktów zgazowania modeli jednorazowych, a co za tym idzie ewakuacji gazów z formy. Dzięki zbliżeniu wyników symulacji do rzeczywistych procesów możliwe jest bardziej szczegółowe interpretowanie kinetyki rozkładu modelu polistyrenowego i samej ewakuację powstałych gazów w tym procesie.

Uzyskane wyniki badań przepuszczalności są wynikami, poniekąd spodziewanymi. Dla próbek z naniesionym pokryciem ogniotrwałym uzyskano znacząco niższe przepuszczalności w porównaniu do próbek bez pokrycia. W związku z powyższym jednoznacznie można stwierdzić że zastosowanie pokrycia ogniotrwałego wpływa na znaczące obniżenie przepuszczalności, a tym samym pogarsza zdolność ewakuacji gazów z wnęki formy.

Badania laboratoryjne przepuszczalności masy formierskiej stały się inspiracją do przeprowadzenia symulacji zjawisk zachodzących podczas przepływu powietrza przez porowatą próbkę na stanowisku pomiarowym. Analiza uzyskanych wyników obliczeń i pomiarów pozwoliła na określenie dodatkowych cech próbki masy formierskiej jak procentowy udział porów otwartych.

W oparciu o przeprowadzone badania i obliczenia oraz otrzymane wyniki sformułowane zostały następujące spostrzeżenia:

1. Początkowe wyniki symulacji komputerowej przepuszczalności masy formierskiej, były dalekie od wyników rzeczywistych. Powodem takiej zależności był prawdopodobnie uproszczony dobór parametrów Inertial Resistance i Viscous Resistance tylko na podstawie uśrednionych parametrów geometrii osnowy masy.

2. W celu uzyskania wyników zbliżonych do rzeczywistości, konieczne było przeprowadzenie iteracyjne rozwiązanie zadania odwrotnego i szukanie odpowiednich wartości Inertial Resistance.

3. Symulacje komputerowe przepuszczalności masy formierskiej stanowią pomocne narzędzie do oceny parametrów procesu i właściwości masy formierskiej trudnych lub wręcz niemożliwych do określenia w inny sposób, natomiast ich interpretacja powinna odbywać się ze szczególną ostrożnością.

Wstępne badania symulacyjne niemodyfikowanej próby Ruffa stanowiły początkowy etap implementacji badań laboratoryjnych przepuszczalności masy formierskiej do środowiska programu MagmaSoft. Dla tego etapu badania dotyczyły wpływu różnej ziarnistości masy formierskiej na lejność, która jest zależna także od przepuszczalności formy.

Przeprowadzone wstępne badania symulacyjne pozwoliły sformułować następujące spostrzeżenia:

- w metodzie Full Mold jednym z kluczowych parametrów wpływających na tempo wypełniania wnęki formy jest grubość pokrycia ogniotrwałego, sterowanie tym parametrem technologicznym w środowisku symulacyjnym, daje zauważalne różnice w tempie i stopniu wypełniania wnęki formy,

- ziarnistość osnowy (piasek formierski) masy formierskiej, w dużym stopniu wpływa na lejność, co zostało udowodnione w przeprowadzonych badaniach,

- badania wykazały niższą przepuszczalność masy formierskiej z pokryciem alkoholowym z mączką cyrkonową w porównaniu do masy z pokryciem grafitowym.

Badania eksperymentalne z zastosowaniem zmodyfikowanej próby lejności Ruffa stanowią weryfikację i walidację wyników przeprowadzonych badań laboratoryjnych.

Zgazowanie modelu polistyrenowego to złożony proces, na który wpływa wiele czynników technologicznych. Konieczne zatem jest zdefiniowanie dodatkowych, oprócz tych związanych z metalurgią, transportem ciepła i samym krzepnięciem, danych związanych z termicznym rozkładem modelu i ilością otrzymanych produktów zgazowania. Istotne również w samym procesie jest transport powstałych gazów z wnęki formy do otoczenia. Obecnie stosowane programy symulacyjne nie umożliwiają w pełni zdefiniować wszystkich potrzebnych danych istotnie charakteryzujących proces pełnej formy. Program MagmaSoft, który został użyty w przeprowadzonych badaniach, posiada moduł Lost Foam, natomiast zastosowane w nim „uproszczenia” również nie gwarantują bezpośredniego przełożenia wyników symulacyjnych na rzeczywisty proces odlewania. Zauważalne jest to w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych zmodyfikowanej próby Ruffa, na podstawie których można sformułować następujące spostrzeżenia:

- zastosowana w przeprowadzonych badaniach zmodyfikowana próba lejności Ruffa, pozwolił uzyskać zadawalające wyniki, które mogą zostać wdrożone w celu zwiększenia efektywności procesu Lost Foam / Full Mold,

- przepuszczalność formy jest zależna od parametrów masy formierskiej czyli od własności fizykochemicznych osnowy jak i zastosowanych udziałów środków wiążących. Formy wykonane na osnowie masy formierskiej o mniejszej ziarnistości odznaczały się mniejszą przepuszczalnością formy,

- odnotowany został istotny wpływ pokrycia ogniotrwałego na zwiększenie oporu formy w kontekście przepuszczalności produktów zgazowywania modelu polistyrenowego,

- program MagmaSoft nie daje możliwości prostej implementacji danych doświadczalnych, w celu uzyskania wyników symulacyjnych zbliżonych do rzeczywistego procesu wypełniania,

- w celu uzyskania warunków zbliżonych do rzeczywistych konieczne jest doświadczalne opracowanie danych potrzebnych do symulacji oraz jej walidacja. Sama walidacja jest związana z licznymi iteracjami, co wpływa na wydłużenie procesów optymalizacyjnych technologii wypełniania.

Po badaniach zmodyfikowanej próby lejności Ruffa ostatnim etapem badań była analiza wpływu stosunku pola powierzchni do objętości modelu na proces wypełniania formy. Zagadnienie to stanowi ważną część rozważań związaną z geometrią modelu jednorazowego i jego termiczną degradacją. Otrzymane wyniki stanowią cenną wiedzę przydatną do głębszego poznana kinetyki rozkładu modelu w technologii pełnej formy. Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że kluczowym czynnikiem mającym wpływ na proces wypełniania jest zastosowane pokrycie ogniotrwałe, a zatem wynikowa przepuszczalność gazowa formy.

10. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych: badań, symulacji i eksperymentalnych odlewów oraz ich analizy można sformułować następujące wnioski:

1. Jednoznacznie stwierdzony został wpływ takich parametrów procesu odlewania metodą Lost Foam jak: właściwości masy formierskiej, rodzaj pokrycia ogniotrwałego, właściwości materiału modelu i temperatura metalu na przebieg procesu wypełniania formy, czym udowodniono główną tezę pracy.

2. W toku badań stwierdzono, że im większe pole powierzchni modelu / odlewu w odniesieniu do jego objętości, tym natężenie wad powierzchni odlewu jest mniejsze. Zasadnicze znaczenie ma tutaj wielkość chwilowej powierzchni ewakuacji gazów ze szczeliny pirolizy do formy, czym potwierdzona została druga teza postawiona w pracy nr 2.

3. Wspomaganie symulacją komputerową projektowanie technologii odlewania metodą pełnej jest możliwe, ale wymaga pozyskania danych materiałowych w badaniach laboratoryjnych oraz odpowiedniej ich implementacji i weryfikacji w programie symulacyjnym. Ponadto, szczególnie na początkowym etapie wdrażania opracowanej metodyki w odlewni konieczne jest przeprowadzenie walidacji w oparciu o wyniki testów przemysłowych.

SPIS TABEL

Tabela 2.2.1. Zestawienie programów symulacyjnych dla przemysłu odlewniczego [81] 24
Tabela 5.1.1. Zestawianie materiałów zastosowanych w badaniach testujących i zasadniczych 35
Tabela 5.2.1. Zestawienie zastosowanej ziarnistości osnowy w badaniach wstępnych przepuszczalności masy formierskiej.....37
Tabela 5.2.2. Zestawienie udziałów osnowy i środków wiążących w badaniach zasadniczych przepuszczalności masy formierskiej 37
Tabela 5.2.3. Udziały osnowy i materiałów wiążących masy formierskiej 38
Tabela 5.2.4. Zestawienie materiałów na formy i modele użytych w badaniach.....38
Tabela 6.1.1. Dane próbek polistyrenu w badaniach testowych stanowiska 45
Tabela 6.1.2. Przykładowe wyniki obliczeń gęstości produktów pirolizy.....47
Tabela 6.3.1. Zestawienie udziałów materiałów osnowy użytej w badaniach masy formierskiej 51
Tabela 6.5.1.Własności modeli laboratoryjnych użytych w badaniach 60
Tabela .6.5.2. Cechy modeli quasi-przemysłowych użytych w badaniach.....61
Tabela 6.5.3. Parametry symulacji komputerowych; laboratoryjnych i quasi-przemysłowych 62
Tabela 7.2.1. Zestawienie wartości obliczeniowych pola powierzchni pomiędzy krzywą referencyjną, a badaną.....71
Tabela 7.2.2. Wyniki obliczeń gęstości produktów pirolizy – badania wstępne.....73
Tabela 7.2.3. Wyniki obliczeń gęstości produktów pirolizy – badania zasadnicze 73
Tabela 7.3.1. Wyniki przepuszczalności masy formierskiej dla próbek bez pokrycia....74
Tabela 7.3.2. Wyniki przepuszczalności masy formierskiej dla próbek z pokryciem 75
Tabela 7.4.1. Viscous Resistance i przepuszczalność dla trzech wielkości średnic zastępczych ziarna masy formierskiej.....76
Tabela 7.4.2. Wyniki obliczeń wartości Inertial Resistant dla 100%, 50 i 25% otwartych porów 76
Tabela 7.4.3. Zestawienie rzeczywistych wartości wyników przepuszczalności z zasymulowanymi wartościami.....76
Tabela 7.4.4. Wyniki badań przepuszczalności wykonane na aparacie LPiR-3e, wartości przepuszczalności obliczone dla IR oszacowanego w zadaniu odwrotnym 77

Tabela 7.4.5. Wartości współczynników zależności i parametrów statystycznych dla średnicy zastępczej 0,00029m....77
Tabela 7.4.6. Wartości współczynników zależności i parametrów statystycznych dla średnicy zastępczej 0,00030m....77
Tabela 7.4.7. Wartości współczynników zależności i parametrów statystycznych dla średnicy zastępczej 0,00031m....78
Tabela 7.4.8. Wartości IR wraz z oszacowanymi na tej podstawie uśrednionej porowatości próbek rzeczywistych....80
Tabela 7.6.1. Zarejestrowane czasy zalewania dla 6 form eksperymentalnych....86
Tabela 7.6.2. Zestawienie wartości objętościowego natężenia przepływu zastosowanych w symulacjach....87
Tabela 7.7.1. Zestawienie czasów wypełniania wnęki formy dla symulacji i rzeczywistych prób laboratoryjnych....93
Tabela 7.7.2. Zestawienie czasów wypełniania wnęki formy dla symulacji i wytopów rzeczywistych quasi-przemysłowych....93
Tabela 8.1. Zestawienie danych dla procesów rzeczywistego i symulowanego zalewania analizowanych odlewów....101

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1.1. Schemat zalewania a) otwartej, b) zamkniętej formy [24]....9
Rys. 2.1.2. Różnice temperatur zarejestrowane dla otwartej i zamkniętej formy [25]....9
Rys. 2.1.3. Rozkład modelu polimerowego w metodzie pełnej formy [25]....10
Rys. 2.1.4. Schemat etapów produkcji odlewów w metodzie pełnej formy [12]....11
Rys. 2.1.1.1. Schemat procesu Full Mold [12]....12
Rys. 2.1.1.2. Schemat procesu Lost Foam [12]....13
Rys. 2.1.1.3. Schemat procesu Replicast [12]....13
Rys. 2.1.2.1. Materiały wyselekcjonowane do badań....15
Rys. 2.1.4.1. Wada powierzchni odlewu powstała w metodzie pełnej formy (LFC) spowodowana wtrąceniami węgla błyszczącego [38]....18
Rys. 2.1.4.2. Wada węgla błyszczącego [41]....18
Rys. 2.1.4.3. Wada węgla błyszczącego na powierzchni odlewu wielkogabarytowego....19

Rys. 2.1.5.1. Przebieg zmian prędkości zalewania w zależności od gęstości modelu polistyrenowego dla żeliwa [12] 20
Rys. 2.2.1. Czynniki technologiczne wpływające na warunki symulacji wypełniania formy w technologii pełnej formy [84] 25
Rys. 2.2.2. Ogólny schemat blokowy procesu symulacji [84] 25
Rys. 2.2.3. Rozkład temperatury w 104s zalewania [94] 26
Rys. 2.2.4. Rozkład temperatury dla układu ze zwiększonymi wlewami doprowadzającymi [94] 27
Rys. 3.1. Schemat pirolizy w a) pierwszej fazie wypełniania, b) dalszy etap wypełniania 28
Rys. 3.2. Model wymiany ciepła w czasie zalewania w technologii pełnej formy [95] . 29
Rys. 3.3. Krzywe ubytku masy polistyrenu w różnych szybkościach nagrzewania, a) DTG, b) TG [11] 29
Rys. 6.1.1. Koncepcja budowy stanowiska pomiarowego. a) schemat stanowiska badawczego; b) widok w przekroju komory spalania 39
Rys. 6.1.2. Symulowane przebiegi temperatury i ciśnienia w komorze pomiarowej 41
Rys. 6.1.3. Prototyp komory zaprojektowanego stanowiska pomiarowego 42
Rys. 6.1.4. Widok kompletnego stanowiska pomiarowo-badawczego w czasie wykonywania testów 42
Rys. 6.1.5. Krzywe zmian temperatury w komorze spalania, wyniki symulacji 43
Rys. 6.1.6. Krzywe zmian ciśnienia w komorze spalania, wyniki symulacji 43
Rys. 6.1.7. Zestawienie wyników temperatury i ciśnienia w funkcji czasu. 4, 5, 6, 8 - proces nagrzewania wraz z próbką polistyrenową. 1, 2, 3, 7 - proces nagrzewania bez próbki polistyrenowej 44
Rys. 6.1.8. Przykładowy wykres zależności ciśnienia od temperatury - próba numer 9, pole powierzchni między krzywymi 13,50 [bar·K] 45
Rys. 6.1.9. Zmiana gęstości w funkcji temperatury przykładowego materiału na modele jednorazowe z bazy danych termofizycznych MagmaSoft [97] 46
Rys. 6.2.1. Próbki walcowe do badań przepuszczalności masy formierskiej bez pokrycia ogniotrwałego 49
Rys. 6.2.2. Maszyna do badań przepuszczalności masy formierskiej typu LPiR-3e wraz ze specjalną tulejką do mas bezwodnych 49
Rys. 6.2.3. Próbki do badań przepuszczalności masy formierskiej z naniesionym pokryciem 50

Rys. 6.3.1. Sześcian składający się z 27 modelowych „ziaren” osnowy 51
Rys. 6.4.1.1. Forma wraz z modelem próby Ruffa w środowisku programu MagmaSoft 55
Rys. 6.4.1.2. Schemat pirolizy modelu polistyrenowego i spadek ciśnienia w zależność od odległości szczeliny gazowej [97] 55
Rys. 6.4.1.3. Okno zmiany danych pokrycia ogniotrwałego w programie symulacyjnym MagmaSoft [97] 56
Rys. 6.4.1.4. Różnice w wypełnianiu wnęki formy modelu a) bez pokrycia, b) z pokryciem dla zastosowanej identycznej formy 57
Rys. 6.4.2.1. Geometria modelu zmodyfikowanej próby Ruffa użytej w symulacjach dla prób zasadniczych 58
Rys. 6.4.2.2. Część formy z modelami polistyrenowymi i widocznymi rowkami pod termopary 59
Rys. 6.5.1. Modele laboratoryjne użyte w badaniach, a) czworościan foremny, b) kula, c) sześcian 60
Rys. 6.5.2.Model laboratoryjny wraz z układem wlewowym i umiejscowieniem termopar pomiarowych 60
Rys. 6.5.3.Modele quasi-przemysłowe użyte w badaniach.....61
Rys. 6.5.4. Model quasi-przemysłowy wraz z układem wlewowym i umiejscowieniem termopar pomiarowych 62
Rys. 7.1.1. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_4. Pole powierzchni między krzywymi 5,92 bar·K.....63
Rys. 7.1.2. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_5. Pole powierzchni między krzywymi 4,73 bar·K 64
Rys. 7.1.3. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_ 6. Pole powierzchni między krzywymi 5,77 bar·K.....64
Rys. 7.1.4. Wykres zależności ciśnienia od temperatury – P_ 7. Pole powierzchni między krzywymi 6,75 bar·K.....65
Rys. 7.1.5. Wykres zależności ciśnienia od temperatury - P_ 8. Pole powierzchni między krzywymi 15,12 bar·K.....65
Rys. 7.1.6. Wykres zależności ciśnienia od temperatury – P_ 9 Pole powierzchni między krzywymi 13,50 bar·K.....66
Rys 7.2.1. Wyniki dla próbki PR_1 EPS VFG18. Pole powierzchni między krzywymi 5,92 bar·K.....67

Rys 7.2.2. Wyniki dla próbki PR_2 EPS budowlany. Pole powierzchni między krzywymi 4,21 bar·K 67
Rys 7.2.3. Wyniki dla próbki PR_3 XPS. Pole powierzchni między krzywymi 13,46 bar·K 68
Rys 7.2.4. Wyniki dla próbki PR_4 EPP Pole powierzchni między krzywymi 5,77 bar·K 68
Rys 7.2.5. Wyniki dla próbki PR_6 EPE. Pole powierzchni między krzywymi 10,11 bar·K 69
Rys 7.2.6. Wyniki dla próbki PR_7 EPS + PMMA. Pole powierzchni między krzywymi 10,01 bar·K 69
Rys 7.2.7. Wyniki dla próbki PR_8 EPE. Pole powierzchni między krzywymi 7,01 bar·K 70
Rys.7.2.8. Zestawienie obliczonego pola powierzchni dla badań testowych 71
Rys. 7.2.9. Zestawienie obliczonego pola powierzchni dla badań zasadniczych 72
Rys. 7.4.1. Udział porowatości otwartej w zależności od wartości IR dla średnicy zastępczej 0,00029 m^2 78
Rys.7.4.2. Udział porowatości otwartej w zależności od wartości IR dla średnicy zastępczej 0,00030 m^2 79
Rys. 7.4.3. Udział porowatości otwartej w zależności od wartości IR dla średnicy zastępczej 0,00031 m^2 79
Rys. 7.5.1. wyniki symulacji dla próbek bez pokrycia ogniotrwałego dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej. v13 – frakcja piasku0,10/0,071/0,056 mm, v15 –frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm, v14– frakcja piasku0,63/0,40/0,32 mm 81
Rys. 7.5.2. Wyniki symulacji dla próbek z pokryciem cyrkonowym alkoholowym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej. v21 – frakcja piasku 0,10/0,071/0,056 mm, v17 - frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm, v19 – frakcja piasku 0,63/0,40/0,32 mm 81
Rys. 7.5.3. Wyniki symulacji dla próbek z pokryciem grafitowym wodnym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej. v22 – frakcja piasku 0,10/0,071/0,056 mm, v18 - frakcja piasku 0,32/0,20/0,16 mm, v20 – frakcja piasku 0,63/0,40/0,32 mm 82
Rys. 7.5.4. Zestawienie prędkości strugi ciekłego metalu w punktach pomiarowych w symulacji dla próbek bez pokrycia ogniotrwałego dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej 82

Rys. 7.5.5. Zestawienie prędkości strugi ciekłego metalu w punktach pomiarowych w symulacji dla próbek z pokryciem cyrkonowym alkoholowym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej 83
Rys. 7.5.6. Zestawienie prędkości strugi ciekłego metalu w punktach pomiarowych w symulacji dla próbek z pokryciem grafitowym wodnym dla trzech wielkości ziarna osnowy masy formierskiej 83
Rys. 7.6.1. Widok otwartej formy po zalaniu z widocznymi różnicami w stopniu wypełnienia kanałów wnęki formy, próba nr 5 84
Rys.7.6.2. Zestawienie czasów wypełniania w punktach pomiarowych próby nr 5 85
Rys. 7.6.3 Zestawienie czasów wypełniania w punktach pomiarowych próby nr 6 85
Rys. 7.6.4. Wynik symulacji dla zaimplementowanych danych przepuszczalności 86
Rys. 7.6.5. Wynik symulacji V1 87
Rys. 7.6.6 Wynik symulacji V2 88
Rys. 7.6.7. Wynik symulacji V3 88
Rys. 7.6.8. Wynik symulacji V4 89
Rys. 7.6.9. Wynik symulacji V5 89
Rys. 7.6.10. Wynik symulacji V6 90
Rys. 7.6.11. Wynik symulacji V7 90
Rys. 7.6.12. Wynik symulacji V8 91
Rys. 7.6.13. Wynik symulacji V9 91
Rys. 7.6.14 Wynik symulacji V10 92
Rys. 7.7.1. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 8,58% procesu wypełnienia 94
Rys. 7.7.2. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 75,41% procesu wypełnienia 94
Rys. 7.7.3. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 86,8% procesu wypełnienia 95
Rys. 7.7.4. Zestawienie czasów dotarcia metalu do punktów pomiarowych dla symulacji i odlewów rzeczywistych modele laboratoryjne 96
Rys. 7.7.5. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 18,01% procesu wypełnienia 96
Rys. 7.7.6. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 68,00% procesu wypełnienia 97

Rys. 7.7.7. Rozkład prędkości zalewania dla 3 wersji symulacji, 82,00% procesu wypełnienia 97
Rys. 7.7.8. Zestawienie czasów dotarcia metalu do punktów pomiarowych dla symulacji i odlewów rzeczywistych modele quasi-przemysłowe 98
Rys. 7.7.9. Porównanie wad modeli laboratoryjnych powstałych w symulacji i rzeczywistości 99
Rys. 7.7.10 Porównanie wad modeli quasi-przemysłowych powstałych w symulacji i rzeczywistości 99
Rys. 8.1. Geometria modelu nr 1 101
Rys. 8.2. Geometria modelu nr 2 102
Rys. 8.3. Geometria odlewu nr 3 102
Rys. 8.4. Geometria odlewu nr 4 103
Rys. 8.5. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 1 103
Rys. 8.6. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 2 104
Rys. 8.7. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 3 104
Rys. 8.8. Rozkład porowatości wewnętrznych dla odlewu nr 4 105

LITERATURA

1. **Osiatyński W.,** *Poznać świat. Rozmowy o nauce.* Warszawa: Wydawnictwo ”Czytelnik”.1989, strony 45–46. ISBN 8307015731.
2. **Pacyniak T.,** *The effect of refractory coating permeability on the Lost Foam process*. Archives of Foundry Engineering. 2008 Tom 8, nr 3, strony 199-204.
3. **Li *Y.*, Zhu P., Tang C., Sun Z.,** *Effect of Lost-Foam Casting Process on Properties of Spiral Blade.* MDPI Crystals. 2022, Tom 12, nr 8 strony 1-12.
4. **Takamatsu T., Tomita J.,** *Disruptive Innovation: A Case of Full Mold Casting.* Annals of Business Administrative Science. 2015, Tom 14, nr 2, strony 109-126.
5. **Kannan P., Biernacki J. J., Visco D P. Jr.,** *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 Applied Pyrolysis. 2007, Tom 78, nr 1, strony 162-171.
6. **Li Ji-lin, Chen Rong-Shi, Ke Wei**, *Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011, Tom 21, nr 4, strony 761-766.
7. **Landage M. G.**, *Lost Foam casting technology – review paper.* Proceedings of Conference On Insights in mechanical Engineering In Association with Novateur Publications IJIERT-ISSN Nr: 2394-3696. 2019, strony 128-133. ISBN 978-93-87901-04-9.
8. ***Jiang W., Fan Z.,*** *Novel technologies for the lost foam casting process.* Frontiers of Mechanical Engineering. 2018, Tom 13, strony 37-47.
9. **Miller M.,** *Why Lost Foam?* A publication of the American Foundry Society. 2020, strony 41-43.
10. **Jordan S., Debruin M.,** *How a foundry can diversify into Lost Foam Casting at negligible cost.* A publication of the American Foundry Society. 2022, strony 29-33.
11. **Kowalewski T. A., Cybulski A., Michałek T., Kowalczyk M.**, *Laboratoryjne wzorce do walidacji programów odlewniczych.* Warszawa: Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. 2005.
12. **Pacyniak T**., *Metoda Pełnej Formy. Wybrane aspekty.* Łódź: Monografie Politechniki Łódzkiej. 2013.

13. **Xi L., Ya-jun Y., Jian xin Z., Mingo guo X., Wei L.**, *Pyrolysis characteristics and thermal kinetics of expanded polystyrene (EPS) and styrene-methyl methacrylate (St-MMA) copolymer in LFC proces.* China Foundry. 2018, Tom 15, strony 428–435
14. **Żółkiewicz Z.**, *Oddziaływanie produktów cieplnego zgazowania modelu polistyrenowego na powierzchnię odlewu. Archiwum Odlewnictwa.* 2004, Tom 4, nr 11/2, strony 332-337.
15. **Żółkiewicz Z, Jankowski W.,** *Wpływ gazowych produktów destrukcji cieplnej modeli polistyrenowych na własności metalu w procesie pełnej formy.* Solidification of Metals and Alloys. 1997, nr 33, strony 278-285.
16. **Kannan P., Biernacki J. J., Visco D P. Jr.,** *Fast Pyrolysis Kinetics of Expanded Polystyrene Foam.* AIChe Journal. 2009, Tom 56, strony 1569-1577.
17. **Yin Y., Peng X., Zhang Y., Shen X., Li X., Ji X., Zhou J., Xie M., Liu W.,** *The pyrolysis behavior of poly(styrene–methyl methacrylate) copolymer and expanded polystyrene (EPS) foams using model-free and model fitting methods.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023, Tom 148, strony 3505-3513.
18. **Houzeaux G., Codina R.,** A finite element model for the simulation of lost foam casting. International Journal of Numerical Methods in Fluids. 2004, Tom 46, nr 2, strony 203–226.
19. **Kim K., Lee K.,** *Effect of Process Parameters on Porosity in Aluminum Lost Foam Process.* Journal of Materials Sciences and Technology. 2009, Tom 21, nr 5, strony 681-685.
20. **Barone M. R., Caulk D.A.,** *A foam ablation model for lost foam casting of aluminum.* International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005, Tom 48, nr 19-20, strony 4132-4149.
21. **H. F. Shroyer**, *Cavity less casting mold and method of making same*. United States Patent 2830343, 1958.
22. **Clegg A.,** *A Review of Recent Developments and Progress.* 2000.
23. **Sobczak J.,** *Poradnik Odlewnika.2013, Tom 1.*
24. **Lewandowski J. L.**, *Tworzywa na formy odlewnicze.* Kraków: Wydawnictwo ”Akapit”. 1997.
25. **Campbell J.,** *Complete Casting Handbook. Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design.* Ledbury: Elsevier Ltd.. 2011. ISBN–13: 978-1-85617-809-9.

26. **Kuo J., Chen J., Pan Y., Hwang W.,** *Mold Filling Analysis in Lost Foam Casting Process for Aluminum Alloys and Its Experimental Validation.* Materials Transactions. 2003, Tom 44, nr 10, strony 2169-2174.
27. **Buczkowska K.**, *Badania wpływu wybranych parametrów technologicznych na własności modeli ze spienionych tworzyw wielkocząsteczkowych stosowanych w technologii Lost Foam.* Łódź: Politechnika Łódzka. 2013. Rozprawa doktorska.
28. **Wiącek M.,** *Modyfikacja chemiczna polistyrenu w celu ograniczenia jego palności.* Katowice: Uniwersytet Śląski w Katowicach. 2015. Rozprawa doktorska.
29. **Sen I.,** *Degradation Mechanism of Expanded Polystyrene (EPS) Foam in Lost Foam Casting, PIPS approach for Synthesis and Novel Expansion Techniques for Cellular Foam.* Knoxville: University of Tennessee. 2007. Doctoral Dissertations.
30. **Wang C., Ramsay W., Askeland D. R.,** *Transactions Of The Foundrymen's Society. 2003, Tom 105.*
31. **J. J. Mae, Lee S. J., Choe K. H., Huh J. S.,** *Gas Pressure Effect on Sand Collapse in Kinetic Zone of Lost-Foam Casting.* Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering. 2020, Tom 2020, strony 1-9.
32. **Hill M., Vrieze A. E., Moody T. L.**, *Effect of metal velocity on defect formation in al LFC's.* Transactions of the American Foundrymen's Society. 1998, Tom 106, strony 365–374.
33. **Griffiths W. D., Ainsworth M. J.,** *Hydrogen pick-up during mould filling in the lost foam casting of Al alloys*. Journal of Materials Science. 2012, Tom 47, nr 1, strony 145–150.
34. **Chakherlou T. N., Mahdinia Y. V., Akbari A**., *Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process*. Materials and Design. 2011, Tom 32, nr. 1, strony 162–169.
35. **Tschopp M. A., Wang Q. G., Dewyse M. J.,** *Transactions Of The Foundrymen's Society. 2002, Tom 110.*
36. **Jiang W., Fan Z., Liu D., Liao D., Dong X., Zong X.,** *Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture behavior of A356-T6 aluminum alloy fabricated by expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure, gravity casting and lost foam casting.* Materials Science and Engineering:A. 2013, Tom 560, strony 396-403.

37. **Sun W., Littleton H. E., Bates C. E.,** *Formation mechanism of gas cavity defects in lost foam iron castings.* International Journal of Cast Metals Research. 2003, Tom 16, nr 6, strony 549-553.
38. **Campbell J.; Naro R.L.,** *Lustrous carbon on gray iron.* AFS Proceedings. American Foundry Society. 2010, strony 1–6.
39. **Chakherlou T.N., Mahdinia Y.V., Akbari A.,** *Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process*. Materials and Design. 2011, Tom 32, strony 162–169.
40. ***Campbell J.**, Hypothesis for cast Iron microstructures.* Metall. Mater.*2009*. Trans. 40B*, 786–801.*
41. **Jezierski J., Jureczko M., Dojka R.,** *The impact of proces factors on creating defects mainly lustrous carbon, during the production of ductile iron using the Lost-Foam Casting (LFC) method.* MDPI Metals. 2020, Tom 10, strony 1-15.
42. **Prabhakar A., Papanikolaou M., Salonitis K**., *Sand casting of sheet lead: numerical simulation of metal flow and solidification*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, Tom 106, strony 1–13.
43. **Omidiji A.,** *Statistical Analysis of Evaporative Pattern Casting Process Parameters for the Production of Aluminum Alloy Components.* Journal of Casting and Materials Engineering. 2020, Tom 4, nr 3, strony 41-47.
44. **Mikołajczak P., Ignaszak Z.,** *Wpływ zmienności utajonego ciepła krzepnięcia w funkcji temperatury na wyniki symulacji krzepnięcia odlewów*. Poznań: Komisja Budowy Maszyn. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji. 2006, Tom 26, nr 1, strony 65-76.
45. **Sands, M., Shivkumar S.,** *EPS molecular weight and foam density effects in the lost foam proces*s. Journal of Materials Science. 2003, Tom 38, strony 2233-2239.
46. **Żółkiewicz Z., Jankowski W.,** *Wpływ gęstości modelu polistyrenowego na emisję gazów w procesie pełnej formy.* Solidification of Metals and Alloys. 2000, Tom 2, nr 43, strony 553-558.
47. **Buczkowska K., Just P., Świniarska J., Pacyniak T.,** *Wpływ rodzaju, grubości pokrycia ceramicznego oraz gęstości zespołu modelowego na stopień zagazowania odlewu*. Archives of Foundry Engineering. 2015, Tom 15, wydanie specjalne nr 2, strony 7–12.
48. **Chen H., Shan Z., Dong H.,** *Research of foam pattern processing for lost foam casting.* Applied Mechanics and Materials**.** 2013, Tom 331, strony 600-603.

49. **Liu X. J., Bhat R. C., Bhavnani S. H., Overfelt R. A.,** *Transport phenomena in the production and use of expanded polystyrene patterns in lost foam casting.* Materials and Manufacturing Processes 2007, Tom 22, nr 7-8, strony 811–818.
50. **Żółkiewicz Z., M. Żółkiewicz.**, *Characteristic properties of materials for evaporative patterns*. Archives of Foundry Engineering. 2010, Tom 10, wydanie specjalne nr 3, strony 289–292.
51. **Żółkiewicz Z., Baliński A., Żółkiewicz M.**, *The Lost Foam Technology*. Technological Engineering. 2007, Tom 4, nr 1, strony 105–106.
52. **Żółkiewicz Z., Żółkiewicz** M., *Pattern evaporation process.* Archives of Foundry Engineering. 2007 Tom 7 strony 49–52.
53. **Żółkiewicz Z., Baliński A., Żółkiewicz M.,** *Charakterystyka procesu termicznego zgazowywania modeli polistyrenowych.* Prace Instytutu Odlewnictwa. 2017, Tom LVII, Zeszyt 3, strony 203-201.
54. **Żółkiewicz Z.,** *Oddziaływanie produktów cieplnego zgazowania modelu polistyrenowego na powierzchnię odlewu.* Archives of Foundry Engineering. 2004, Tom 4, strony 332-337.
55. **Pacyniak T**., *Teoretyczne i technologiczne podstawy procesu wytwarzania odlewów metodą pełnej formy*. Politechnika Łódzka.2006, Tom Z. 350, Zeszyty Naukowe Nr 985, strony 3-115.
56. **Barone M.R. & Caulk D.A**., *A foam ablation model for lost foam casting of aluminum*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Tom 48, nr 19-20, strony 4132-4149.
57. **Mirbagheri S.M.H., Serajzadeh S., Varahram N. & Davami P**., *Modelling of foam degradation in lost foam casting process*. Materials and Design. 2006 Tom 27, nr 2, strony 115-124.
58. **Khodai M., Mirbagheri S. M. H.,** *Behavior of generated gas in Lost Foam Casting.* World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011 Tom 5, strony 431-435.
59. **Mocek J., Chojecki A.,** *Gas atmosphere formed in casting by full mold process.* Archives of Metallurgy and Materials. 2014, Tom 59, nr 3, strony 1045-1049.
60. **Jamrozowicz Ł., Zych J., Kozień J.,** *Wpływ temperatury na kinetykę utwardzania wybranych mas ze spoiwami.* Archives of Foundry Engineering. 2012, Tom 12, wydanie specjalne nr 1, strony 75-80.

61. **Petrus Ł., Bulanowski A., Kołakowski J., Urbanowicz M., Sobieraj J., Jelonek M., Brzeżański M., Zych J. S., Janerka K.**, *The impact of composition and the densification level of furan molding compounds on the strength of large-size casting mold*s. Archives of Metallurgy and Materials. 2020, Tom 65, nr 4, strony 1431-1436.
62. **Mádi L., Varga L.,** *The effect of gas permeability on the pressure of artificial resin-bonded core gases.* 11th Hungarian Conference on Materials Science, Materials and Science and Engineering 426. 2018.
63. **Sundaram D., Svidró J. T., Svidró J., Diószegi A.,** *On the relations between the gas-permeability and the pore characteristics of furan sand.* MDPI Materials. 2021, Tom 14, nr 14.
64. **Błaszkowski K.,** *Technologia formy i rdzenia.* Wydawnictwo PWSZ. 1970.
65. **Kołodziej R., Kostrzewa Ł., Szajnar J.,** *Problem z wadami gazowymi w odlewni żeliwa.* Archives of Foundry Engineering. 2013, Tom 13, wydanie specjalne nr 3, strony 75-78.
66. **Maniowski Z., Młynski M., Sierant Z., Żółkiewicz Z.,** *Selected aspects of the pieces production of iron alloy castings in terms of their environmental impact.* Archives of Foundry Engineering. 2010, Tom 10, nr 3, strony 163-166.
67. **Dańko R.,** *Badania jakości regeneratu ze zużytych mas ze spoiwem organicznym.* Archives of Foundry Engineering. 2012, Tom 12, wydanie specjalne nr 1, strony 21-26.
68. **Dańko R., Holtzer M., Górny M.,** *Ocena wpływu jakości regeneratu na parametry powierzchniowe odlewów.* Archives of Foundry Engineering. 2014, Tom 14, wydanie specjalne nr 2, strony 17-22.
69. **Karimian M., Ourdjini A., Hasbullah Idris M., JAFARI H.,** Effect of pattern coating thickness on characteristics of lost foam Al.-Si-Cu alloy casting. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012, Tom 22, nr 9, strony 2092-2097.
70. **Pacyniak T., Kaczorowski R.,** *Badanie własności pokryć ogniotrwałych nanoszonych na modele polistyrenowe, stosowane przy wytwarzaniu odlewów metodą Lost Foam.* Archiwum Odlewnictwa. 2003, Tom 3, nr 8, strony 147-156.
71. **Jamrozowicz Ł., Siatko A.,** *The assessment of the permeability of selected protective coatings used for sand moulds and cores.* Archives of Foundry Engineering. 2020, Tom 1, strony 17-22.
72. **Janisz K., Mikulec A., Górka K.,** *Symulacja procesu technologicznego w aspekcie jego logistyki i wydajności.* Instytut Naukowo-Wydawniczy ”SPATIUM’’. Sp. z o. o.

Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2017. Tom R. 18, nr 6, strony 1394-1399.

73. **Chan K.S., Pericleous K., Cross M.**, *Numerical simulation of flows encountered during mold-filling.* Applied Mathematical Modelling. 1991, Tom 15, nr 11-12, strony 624-631.
74. **Bokota A., Sowa L.,** *A numerical simulation of the vertical fluidity test.* Archives of Foundry Engineering. 2010, Tom 10, nr 1, strony 15-18.
75. **Liu B., Qiu W., Shen H., Gao Z.,** *Study and application of mold filling simulation of shaped castings.* J. Mater. Sci. Techno. 1997, Tom 13, nr 2, strony 107-112.
76. **Li Y., Zhou W.,** *Numerical Simulation of Filling Process in Die Casting.* Materials Technology. 2003, Tom 18, nr 1, strony 36-41.
77. **Sowa L., Bokota A.,** *Numerical modelling of thermal and fluid flow phenomena in the mould channel.* Archives of Foundry Engineering. 2007, Tom 7, nr 4, strony 165-168.
78. **Pariona M.M., Salem G.A., Bertelli F., Cheung N.,** *Numerical simulation for prediction of filling process in a sand mould.* Rev. LatinAm. Metal. Mater.2008, Tom 28, nr 2.
79. **Pacyniak T., Kaczorowski R**., *Modeling of mould cavity filling process with cast iron in Lost Foam method Part 2. Mathematical model – Pouring rate.* Archives of Foundry Engineering. 2008, Tom 8, wydanie specjalne 3, strony 75-78.
80. **Patil R.T., Metri V.S., Tambore S.S**., *Analysis and Simulation of Die Filling in Gravity Die Casting using MAGMA Software.* International Journal of Engineering Research & Technology. 2015, Tom 4, nr 11, strony 556-559.
81. **Adekunle A. A., Oki M., Anyim I. K., Ikubanni P. P., Adediran A. A., Balogun A. A., Orhadahwe T. A., Omoniyi P. O., Olabisi A. S., Akinlabi E. T.,** *Recent Development in Casting Technology: A Pragmatic Review.* International Journal of Scientific & Technology Research. 2013, Tom 2, strony 91-102
82. **Ohnaka I., Suigiyama A., Konishi K., Obana Y., Zhu J., Sako N.,** *Computer simulation of Lost Foam Process of cast iron*. Key Engineering Materials. 2011, Tom 457, strony 299-304.
83. **Xie M., Zhu C., Zhou J.,** *Mold-filling and solidification simulation of grey iron in Lost-Foam Casting.* 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering. Advances in Engineering Research. 2015, strony 387-394.

84. **Chen H., Dong H., Shan Z.,** *Numerical simulation and optimization technology of Lost foam casting.* Advanced Materials Research. 2014, Tom 936, strony 1681-1686.
85. **LeVeque R.,** *Finite volume methods for hyperbolic problems.* Cambridge University Press. 2012, ISBN 9780511791253.
86. **Sadecka L.,** *Metoda różnic skończonych i metoda elementów skończonych w zagadnieniach mechaniki konstrukcji i podłoża.* Politechnika Opolska. 2010.
87. **Zienkiewicz O., Taylor C., Leroy R., Zhu J. Z.,** *The finite element method - Its basis and fundamentals*, Butterworth-Heinemann. Elsevier. 2013. ISBN 978-1-85617-633-0.
88. **Zienkiewicz O. C.,** *Metoda elementów skończonych***.** Wydawnictwo Arkady. 1972.
89. **Bossak M.A.,** *Metoda elementów skończonych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej. 1976.
90. **Aćimović-Pavlović Z., Đuričić M., Drmanić S., Đuričić R.,** *The influence of the parameters of lost foam process on the quality of aluminum alloys castings.* Hemijska industria. 2010, Tom 64, nr 2, strony 121-127.
91. **Jafari H., Idris M. H., Shayganpour A.,** *Evaluation of significant manufacturing parameters in lost foam casting of thin-wall Al–Si–Cu alloy using full factorial design of experiment.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013, Tom 23, nr 10, strony 2843-2851.
92. **Shayganpour A., Idris M. H., Izman S., Jafari H**., *DOE applied to study the effect of process parameters on silicon spacing in lost foam Al-SiCu alloy casting.* IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2012, Tom 36, nr 1, strony 1-6.
93. **Kang J., Hao X., Gang N., Long H., Wang T., Hu Y., Huang T.,** *Experimental study on the filling process of the lost foam casting process of a cast iron plate*. International Journal of Materials and Product Technology. 2013, Tom 47, nr 1/2/3/4, strony 188-199.
94. **Pysz S., Żółkiewicz Z., Żuczek R., Maniowski Z., Sierant Z., Młyński M.,** *Badania symulacyjne warunków wypełniania wnęki formy ciekłym metalem w technologii modeli zgazowanych.* Prace Instytutu Odlewnictwa. 2010, Tom L, Zeszyt 3, strony 27-37.
95. **Charchi A., Rezaei M., Hossainpour S., Shayegh J., Falak S.,** *Numerical simulation of heat transfer and fluid flow of molten metal in MMA–St copolymer lost foam casting proces.* Journal of Materials Processing Technology. 2010, Tom 210, nr 14, strony 2071-2080.

96. **Pielichowski J., Sobczak J., Żółkiewicz Z., Hebda E., Karwiński A**., *Analiza termiczna polistyrenowego modelu odlewniczego*. Prace Instytutu Odlewnictwa. 2011, Tom LI, Zeszyt 1, strony 15-21.
97. Help MagmaSoft® 5.5.
98. **Zawada T.,** Próby lejności, Politechnika Śląska, Gliwice 2008.

STRESZCZENIE

Rozprawa pt. „Symulacja komputerowa procesu wypełniania wnęki formy w metodzie Lost Foam z uwzględnieniem wpływu zgazowania modelu i ewakuacji gazów”, zrealizowana została w Katedrze Odlewnictwa Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach w ramach III edycji programu Doktorat Wdrożeniowy. Praca poświęcona jest badaniom nad pozyskiwaniem i implementacją, w programach do symulacji komputerowej, danych potrzebnych w symulacji wypełniania wnęki formy, w metodzie Lost Foam z uwzględnieniem ilościowym zgazowania modelu i ewakuacji gazów.

Pierwsza część pracy stanowi przegląd literatury, w którym na podstawie dostępnych danych, przedstawiona została analiza aktualnego stanu wiedzy, w tematyce technologii pełnej formy, ze szczególnym uwzględnieniem procesu Full Mold / Lost Foam, który jest obecnie stosowany w Odlewni Rafamet, w której realizowane były badania przemysłowe doktoratu wdrożeniowego. Przedstawiono charakterystykę metody pełnej formy oraz opis zjawisk występujących w czasie zalewania form w tej metodzie, które mają wpływ na przebieg procesu wypełniania formy, a uzależnione są przede wszystkim od ilości produktów zgazowania modelu jednorazowego i przepuszczalności formy. Zagadnienia te stanowią kluczową wiedzę w aspekcie symulacji komputerowej odlewania metodą Lost Foam / Full Mold. Przedstawione zostały również dane literaturowe i doświadczenia własne dotyczące wad odlewów, wynikających z niekorzystnego wpływu czynników technologicznych metody pełnej formy na jakość odlewów.

Na podstawie analizy danych literaturowych i doświadczeń własnych z Odlewni Rafamet, sformułowane zostały tezy oraz postawione cele badawcze, które zostały ukierunkowane na kilka obszarów. Pierwszy z nich stanowił opracowanie metodyki pozyskania danych na potrzeby symulacji komputerowej w badaniach laboratoryjnych. Kolejny to implementacja i weryfikacja uzyskanych danych laboratoryjnych do środowiska programu symulacyjnego. Natomiast, ostatni obszar badawczy stanowiła walidacja symulacji komputerowej, na podstawie eksperymentalnych prób laboratoryjnych, quasi-przemysłowych oraz przemysłowych.

W kolejnych rozdziałach pracy, przedstawione zostały materiały użyte w badaniach, metodyka badawcza, uzyskane wyniki badań i obliczeń, ich analiza oraz

potencjał wdrożeniowy, całość kończy podsumowanie, w którym zawarto liczne szczegółowe spostrzeżenia oraz najważniejsze wnioski.

Materiały użyte w badaniach symulacyjnych, laboratoryjnych oraz przemysłowych, scharakteryzowano w rozdziale nr 5. Rozdział ten zawierał opis materiałów zastosowanych na modele jednorazowe, przeznaczone do badań na zaprojektowanym i zbudowanym, w ramach realizacji pracy, prototypowym stanowisku do ilościowej oceny produktów zgazowania modeli jednorazowych. Opisane zostały również materiały formierskie, które zostały użyte do wykonania próbek do badań laboratoryjnych oraz form testowych w badaniach laboratoryjnych, quasi-przemysłowych i przemysłowych.

Szczegółowa metodyka laboratoryjnych, symulacyjnych, obliczeniowych i eksperymentalnych prac badawczych przedstawiona została w rozdziale 6. W rozdziale tym opisane zostało, zaprojektowane i zbudowane prototypowe stanowisko do zgazowywania materiałów na jednorazowe modele odlewnicze, które zostało opracowane w celu pozyskania ilościowych danych dotyczących produktów pirolizy modeli jednorazowych. Przedstawiono metodologię badań laboratoryjnych i symulacyjnych przepuszczalności masy formierskiej jako sposób pozyskania wartości gazoprzepuszczalności masy formierskiej, która stanowi podstawę implementacji danych formy do programu symulacyjnego MagmaSoft. Ponadto, rozdział ten zawiera opis badań symulacyjnych dla niezmodyfikowanej próby lejności Ruffa, na podstawie których, określono wpływ parametrów wirtualnego procesu i własności wirtualnej formy na lejność i tempo wypełniania wnęki w metodzie pełnej formy. Ponadto, przedstawiono metodykę badań eksperymentalnych i symulacyjnych, dla zmodyfikowanej, na potrzeby realizacji pracy, próby lejności Ruffa, która stanowiła podstawę walidacji symulacji komputerowej, w oparciu o wyniki zalewania form testowych. W ostatniej części rozdziału przedstawiona została metodyka badań, wpływu stosunku pola powierzchni do objętości modelu/odlewu na proces wypełniania formy. Badania przeprowadzono wykonując odlewy testowe, o specjalnie w tym celu zaprojektowanej geometrii, w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach quasi-przemysłowych. Proces wypełniania wnęki formy dla obu typów odlewów testowych został także zasymulowany, a analiza porównawcza wyników prób rzeczywistych i symulacji stanowiła kolejny etap weryfikacji zaimplementowanych danych i walidacji modelowania.

Wyniki badań symulacyjno-eksperymentalnych, wraz z analizą porównawczą zawiera rozdział 7. Zestawienie to obejmuje porównanie ilości produktów zgazowania badanych materiałów, określonej na podstawie wartości ciśnienia w komorze spalania, wyniki badań laboratoryjnych i symulacyjnych przepuszczalności, analizę porównawczą wypełniania wnęki wirtualnej i rzeczywistej formy niezmodyfikowanej i zmodyfikowanej próby lejności Ruffa oraz wyniki badań wpływu stosunku pola powierzchni do objętości modelu/odlewu na przebieg wypełniania formy, przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych i quasi-przemysłowych.

Wysoki potencjał wdrożeniowy, opracowanej na podstawie przeprowadzonych badań, metodyki pozyskiwania danych do symulacji komputerowej odlewania metodą pełnej formy, ich weryfikacji i implementacji w programach symulacyjnych, udowodniony został w rozdziale 8. W rozdziale zaprezentowana została analiza porównawcza wyników pomiarów przemysłowych procesu wypełniania wnęki formy, symulacji tego procesu dla danych i ustawień „domyślnych” programu symulacyjnego i symulacji dla danych pozyskanych i zaimplementowanych zgodnie z opracowaną metodyką. Porównania dokonano dla czterech typowych dla Odlewni Rafamet odlewów, wytwarzanych metodą pełnej formy.

Rozdziały 9 i 10 zawierają kolejno dyskusję wyników i spostrzeżenia oraz wnioski.

SUMMARY

Dissertation entitled "Computer simulation of the mold cavity filling process in the Lost Foam method consideration of impact of model gasification and gas evacuation", was carried out at the Department of Foundry Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology in Gliwice, as part of the 3rd edition of the Implementation Doctorate program. The work is devoted to research on acquisition and implementation of the necessary data in computer simulation software, in the simulation of filling the mold cavity using the Lost Foam method, taking into account the quantitative model gasification and gas evacuation.

The first part of the work is a literature review in which, based on available data, an analysis of the current state of knowledge in the field of full mold technology is presented, with particular emphasis on the Full Mold / Lost Foam process. Which is currently used at the Rafamet Foundry, where the industrial research of the implementation doctorate was carried out. The characteristics of the Full Mold method and a description of the phenomena occurring during pouring the molds in this method are presented. This influence the course of the mold filling process and depend primarily on the amount of gasification products of the disposable model and the permeability of the mold. These issues constitute essential knowledge in terms of computer simulation of Lost Foam / Full Mold pouring. Literature data and personal own experience regarding casting defects, resulting from the unfavorable impact of technological factors of the full mold method on the quality of castings, were also presented.

Based on the analysis of literature data and experience from the Rafamet Foundry, theses were formulated, and research objectives were set, which were focused on several areas. The first one was the development of a methodology for obtaining data for computer simulation in laboratory tests. The next step is the implementation and verification of the obtained laboratory data into the simulation program environment. The last research area was the validation of computer simulation based on laboratory, quasi-industrial and industrial experimental tests.

The materials, research methodology, obtained research and calculation results, their analysis and implementation potential, used of the work in research are presented in the following chapters, whereas the whole ends with a summary containing numerous detailed observations and the most important conclusions.

The materials used in simulation, laboratory and industrial tests were characterized in Chapter No. 5. This chapter include a description of the materials used for disposable models intended for testing on a prototype stand designed and built as part of the work for the quantitative assessment of gasification products of disposable models. Molding materials that were used to make samples for laboratory tests and test molds in laboratory, quasi-industrial and industrial tests are also described.

Detailed methodology of laboratory, simulation, computation, and experimental research work is presented in Chapter 6. This chapter describes the designed and built prototype station for gasification of materials for disposable casting models, which was developed in order to obtain quantitative data on the pyrolysis products of disposable models. The methodology of laboratory and simulation tests of the permeability of molding sand is presented as a way to obtain the gas permeability value of molding sand, which is the basis for the implementation of mold data into the MagmaSoft simulation software. Additionally, this chapter contains a description of simulation tests for the unmodified Ruff castability test, based on which the influence of virtual process parameters and virtual mold properties on the flowability and cavity filling rate in the full mold method were determined. In addition, the methodology of experimental and simulation research was presented for the Ruff castability test. Test was modified for the purposes of this work, which was the basis for the validation of the computer simulation based on about the results of pouring test molds. The last part of the chapter presents the methodology for testing the influence of the ratio of the surface area to the volume of the model/casting on the process of filling the mold. The tests were carried out by making test castings with specially designed geometry in laboratory and quasi-industrial conditions. The process of filling the mold cavity for both types of test castings was also simulated. The comparative analysis of the results of real tests and simulations was the next stage of verification of the implemented data and modeling validation.

The results of simulation and experimental tests, together with a comparative analysis, are included in Chapter 7. This issue covers a comparison of the amount of gasification products of the tested materials determined based on the pressure value in the combustion chamber, the results of laboratory and simulation tests of permeability, a comparative analysis of filling the virtual cavity and the actual unmodified and modified form. Ruff’s castability test, and the results of research on the influence of the ratio of the

surface area to the volume of the model/casting on the process of filling the mold, were carried out in laboratory and quasi-industrial conditions.

The high implementation potential of the data acquisition methodology for computer simulation of full-mold casting, developed on the basis of the conducted research, their verification and implementation in simulation programs has been proven.in chapter 8. The chapter presents a comparative analysis of the results of industrial measurements of the process of filling the mold cavity, simulation of this process for data and “default” settings of the simulation program and simulation for the acquired data and implemented in accordance with the developed methodology. The comparison was made for four castings typical for the Rafamet Foundry, manufactured using the full mold method.

Chapters 9 and 10 contain a discussion of the results and observations and conclusions.