

Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechniki Śląskiej

Praca zbiorowa pod redakcją  
Tadeusza WIECZORKA i Marcina BLACHNIKA

# MODELOWANIE FIZYCZNE I NUMERYCZNE PROCESÓW



GLIWICE 2020

MONOGRAFIA



**Praca zbiorowa pod redakcją  
Tadeusza WIECZORKA i Marcina BLACHNIKA**

**MODELOWANIE FIZYCZNE  
I NUMERYCZNE PROCESÓW**

**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ  
GLIWICE 2020  
UIW 48600**

***Opiniodawcy***

Prof. dr hab. inż. Jarosław MIZERA

Prof. dr hab. inż. Andrzej ZIELIŃSKI

***Kolegium redakcyjne***

REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ

REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Magdalena JABŁOŃSKA, prof. PŚ

SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Jolanta NIDERLA-WITKOWSKA

**Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej**

*Wydanie z materiałów przygotowanych przez Autorów*

***Projekt okładki***

Tomasz LAMORSKI

e-ISBN 978-83-7880-758-2

© Copyright by  
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
Gliwice 2020

## SPIS TREŚCI

<b>WPROWADZENIE</b> .....	5
<b>Tadeusz WIECZOREK - MODELOWANIE FIZYCZNE I NUMERYCZNE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH</b>	
<b>Rozdział 1</b> .....	9
<b>Tadeusz WIECZOREK, Marcin BLACHNIK, Sławomir GOLAK - INTELIGENTNE MODELOWANIE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH</b>	
<b>Rozdział 2</b> .....	34
<b>Jacek PIEPRZYCA, Tomasz MERDER, Mariola SATERNUS, Bogdan PANIC - ZARYS ROZWOJU BADAŃ MODELOWYCH PROCESÓW METALURGICZNYCH</b>	
<b>Rozdział 3</b> .....	88
<b>Albert SMALCERZ, Bartosz WĘCKI - WIELKOŚĆ POWIERZCHNI WYMIANY MASY W PROCESIE RAFINACJI METALI TECHNOGIAMI VIM I ISM</b>	
<b>Rozdział 4</b> .....	114
<b>Mariusz WNEK - MODELOWANIE CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNEJ KOMPAKTOWYCH REGENERATORÓW CIEPŁA DLA PALNIKÓW GAZOWYCH</b>	
<b>Rozdział 5</b> .....	137
<b>Marek TKOCZ - MODELOWANIE PROCESÓW PRZERÓBKI PLASTYCZNEJ</b>	

## TABLE OF CONTENTS

<b>INTRODUCTION</b> .....	5
<b>Tadeusz WIECZOREK – PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELLING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES</b>	
<b>Chapter 1</b> .....	9
<b>Tadeusz WIECZOREK, Marcin BLACHNIK, Sławomir GOLAK – TECHNOLOGICAL PROCESSES MODELLING BY THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS</b>	
<b>Chapter 2</b> .....	34
<b>Jacek PIEPRZYCA, Tomasz MERDER, Mariola SATERNUS, Bogdan PANIC - AN OUTLINE OF THE DEVELOPMENT IN MODEL RESEARCH OF METALLURGICAL PROCESSES</b>	
<b>Chapter 3</b> .....	88
<b>Albert SMALCERZ, Bartosz WĘCKI - THE SIZE OF AREA OF MASS EXCHANGE IN THE PROCESS OF METAL REFINING WITH VIM AND ISM TECHNOLOGIES</b>	
<b>Chapter 4</b> .....	114
<b>Mariusz WNEK - MODELING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPACT HEAT REGENERATORS FOR GAS BURNERS</b>	
<b>Chapter 5</b> .....	137
<b>Marek TKOCZ - MODELING OF PLASTIC FORMING PROCESSES</b>	

## **WPROWADZENIE**

### **MODELOWANIE FIZYCZNE I NUMERYCZNE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH**

Rola modeli, szczególnie w inżynierii, jest bardzo ważna. Służą one nie tylko do rozwiązania konkretnego problemu, ale także pomagają zrozumieć badane zagadnienie. Cały XIX i większość XX wieku to dominacja modelowania matematycznego, głównie liniowego. Metody te wielokrotnie doprowadziły do dobrych wyników. Tam jednak, gdzie brak przesłanek do stosowania modelu liniowego, bardzo silnym narzędziem stają się metody modelowania bazujące na sztucznej inteligencji. Pozwalają one tworzyć nieliniowy model zjawisk i procesów. W ostatnich latach powstaje nowa metodologia modelowania skomplikowanych procesów, gdyż możliwe jest odwzorowywanie bardzo złożonych zależności.

W rozdziale I niniejszej monografii omówiono rolę i możliwości zastosowania systemów uczących się, które można traktować, jako nową technikę obliczeniową, nazywaną również metodami inteligencji obliczeniowej (MIO, ang. computational intelligence methods). Matematyczne modelowanie opiera się dzisiaj najczęściej na gotowych, najczęściej komercyjnych pakietach oprogramowania zawierających zestawy narzędzi programowych, w postaci skompilowanej, bez dostępu do kodów źródłowych. Wykonywane za ich pomocą obliczenia numeryczne są z definicji przybliżone. A więc mimo tego, że dążymy do uzyskania rozwiązania dokładnego, rzadko to osiągamy. Niepewność danych wejściowych do obliczeń oraz uproszczenia konieczne na każdym etapie formułowania problemu rujną najlepsze plany. Zwykle jednak te tzw. inteligentne metody nie odwzorowują wiedzy zawartej w danych w postaci zrozumiałej dla człowieka. Dlatego dodatkowo, potrzebne są metody ekstrakcji wiedzy z nauczonych modeli, celem stworzenia możliwości interpretacji przebiegu procesu i wpływania na jego wyniki. Ostatnim krokiem, jaki pozostaje do zrobienia, aby inteligentny system mógł być praktycznie zastosowany w przemyśle, jest implementacja programowa algorytmów i integracja tych programów z rzeczywistymi układami pomiarowymi i sterowania. Inteligentna analiza danych

miarowych pobieranych z procesu technologicznego pozwoli na wydobycie z nich wiedzy w postaci reguł, znalezienie korelacji między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi, wyznaczenie rozkładów statystycznych poszczególnych parametrów, a także może spełniać rolę preprocesora danych dla algorytmów uczących się. Tworzone w oparciu o takie podejście modele inteligentne, pozwalają zarówno na stawianie prognoz, czyli przewidywanie odpowiedzi modelu w przyszłych chwilach czasu (predykcja może dotyczyć zmiennych ilościowych - mowa wtedy o zmiennych prognozowanych, lub zmiennych jakościowych - mowa wtedy o zdarzeniach prognozowanych), a także na analizę zmienności wyjść modelu (wielkości wyjściowych, zmiennych zależnych) w zależności od wartości zmiennych wejściowych (zmiennych niezależnych). Modele inteligentne stosowane są w wielu zagadnieniach praktycznych z obszaru inżynierii, ekonomii, biologii czy medycyny.

W rozdziale II przedstawiono badania modelowe procesów metalurgicznych. Początkowo wykorzystywano głównie modelowanie fizyczne. Wraz z rozwojem technik informatycznych zaczęto stosować również symulacje numeryczne. Obecnie te dwie metody wykorzystuje się łącznie pod nazwą modelowania hybrydowego. Budowę prostych modeli fizycznych pieca szybkiego zainicjowano już w latach 70-tych ubiegłego wieku. Jednak istotny rozwój tej działalności przypada na lata 90-te. Wówczas, dla realizacji badań przepływu przez złoża kawałkowe gazu obciążonego pyłem postanowiono wybudować kompleksową instalację badawczą wykorzystując dotychczasowe doświadczenia. Jedną z pierwszych był wodny model fizyczny krystalizatora urządzenia COS. Wodny, ponieważ ciekła stal reprezentowana jest w nim przez wodę. Model ten powstał w oparciu o podstawowe zasady teorii podobieństwa. Umożliwiał wizualizację sposobu mieszania się ciekłej stali w krystalizatorze w zależności od konstrukcji zainstalowanego w nim modelu wylewu zanurzeniowego dzięki zastosowaniu znacznika w postaci wodnego roztworu  $KMnO_4$ . W tym okresie rozpoczęto również prace związane z modelowaniem procesów kadziowych. Powstały wówczas pierwsze modele kadzi stalowniczych, w których badano zjawiska zachodzące podczas procesu argonowania. W roku 2016 na wydziale Inżynierii Materiałowej powstało bardzo nowoczesne laboratorium modelowe, umożliwiające prowadzenie badań w pełnym zakresie technologii metalurgicznych prowadzonych w przedsiębiorstwach hutniczych. Zakres ten obejmuje: zjawiska zachodzące podczas wytapiania surówki żelaza w wielkim piecu, zjawiska zachodzące w trakcie wytapiania stali w konwertorze tlenowym, zjawiska zachodzące podczas obróbki pozapiecowej stali – zarówno w piecokadzi, jak i obróbki próżniowej

na urządzeniu RH i wreszcie zjawiska zachodzące podczas odlewania stali metodami tradycyjnymi, a przede wszystkim w urządzeniu do ciągłego odlewania stali.

W rozdziale III, poświęconym wyznaczaniu pola powierzchni wymiany masy w procesie rafinacji, przedstawiono metodę określanie pola powierzchni międzyfazowej ciekły stop – faza gazowa. Do oszacowania wielkości menisku opracowano autorską metodę wykorzystującą oznaczenie powstałych powierzchni swobodnych. Omówiono metody topienia indukcyjnego w procesach rafinacji, w szczególności budowę i działanie nowoczesnego pieca indukcyjnego z zimnym tygłem. Szeroko przedstawiono wyniki badania procesu rafinacji aluminium. W ramach tych badań opracowano metodykę pomiaru pola powierzchni ciekłego metalu. W trakcie topienia badanych stopów aluminium w PIT i PZT zaobserwowano znaczną różnicę w wielkości powierzchni ciekłej kąpieli metalicznej. Wyznaczone pola powierzchni powstałych menisków podczas topienia stopów z wykorzystaniem PZT są znacznie większe niż w PIT. Proces eliminacji cynku ze stopu aluminium w przypadku procesów rafinacyjnych prowadzonych w tej samej temperaturze i ciśnieniu przebiega intensywniej przy wykorzystaniu PZT, jednak koszt energii elektrycznej potrzebnej do prowadzenia całego procesu jest kilkukrotnie wyższy dla PZT niż PIT.

W rozdziale poświęconym modelowaniu charakterystyki dynamicznej regeneratorów ciepła, rozwiązanie modelu regeneratora uzyskano numerycznie, z wykorzystaniem opracowanego w tym celu programu komputerowego. Na podstawie opracowanego matematycznego modelu regeneratora ciepła powstał program komputerowy, który służy do symulacji działania regeneratora i jego nieustalonych stanów cieplnych. W programie komputerowym zastosowano metodę różnic skończonych. Podstawą obliczeń są równania bilansu energii dla fazy płynnej i stałej z wykorzystaniem tzw. metody bilansów elementarnych. W ramach walidacji, matematycznego modelu działania regeneratora ciepła, przeprowadzono badania stanowiskowe na piecu kuziennym i przepływowej komorze grzewczej. Analiza otrzymanych wyników wykazała bardzo dobre dopasowanie modelu na poziomie różnicy do 2%. W rezultacie zastosowania numerycznego modelowania działania palnikowego regeneratora ciepła otrzymano podstawową charakterystykę dynamiczną tej konstrukcji. Przedstawia ona temperaturę płynów i wypełnienia w fazie rozruchu działania regeneratora aż do uzyskania stanu pseudo ustalonego - charakteryzującego się fluktuacją temperatury wypełnienia i przepływających mediów w ustabilizowanym zakresie. Przygotowany matematyczny model działania regeneratora i zastosowanie go do numerycznych symulacji w programie komputerowym umożliwia sprawdzenie nowych konstrukcji wypełnienia regeneratora lub sprawdzenie przydatności materiału



do celów budowy regeneratora w kontekście uzyskiwania bardzo wysokich temperatur podgrzewanego powietrza.

W rozdziale poświęconym modelowaniu procesów przeróbki plastycznej scharakteryzowano najczęściej wykorzystywane metody do projektowania i analizy procesów przeróbki plastycznej i obróbki cieplno-plastycznej oraz przedstawiono przykłady ich wykorzystania do rozwiązywania konkretnych problemów naukowych i inżynierskich. Opisano zastosowania modelowania fizycznego oraz matematycznego do projektowania procesu przeróbki plastycznej. Podano przykłady modelowania dla następujących operacji: kucia w kowarce, kucia wydłużającego na prasie hydraulicznej, walcowania prętów, gięcia i tłoczenia blachy warstwowej, rozciągania rury ze spoiną laserową i niekonwencjonalnego kucia stemplem segmentowym, jak również przykłady modelowania MES zachowania się materiałów podczas laboratoryjnych prób odkształcania plastycznego oraz modele zmian mikrostruktury materiałów odkształcanych na gorąco. Na podstawie przedstawionych przykładów można stwierdzić, że matematyczne metody modelowania procesów przeróbki plastycznej są w połączeniu z eksperymentami fizycznymi bardzo efektywnym i skutecznym narzędziem wspomagającym dobór parametrów procesów przeróbki plastycznej i obróbki cieplno-plastycznej.

Prof. dr hab. Tadeusz Wieczorek

Kierownik Katedry Informatyki Przemysłowej

Tadeusz WIECZOREK<sup>1</sup> , Marcin BLACHNIK<sup>1</sup> , Sławomir GOLAK<sup>1</sup>

## **Rozdział 1**

# **INTELIGENTNE MODELOWANIE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH**

### **1.1. Wstęp**

Systemy uczące się zdobyły ostatnio ogromną popularność w wielu dziedzinach, nie tylko ze względu na ich zdolność do uczenia się, ale także na ich użyteczność i znacznie wyższą dokładność w stosunku do klasycznych metod. Mogą być stosowane do rozwiązywania problemów identyfikacji, klasyfikacji i analizy obrazów, rozpoznawania wzorców, aproksymacji, optymalizacji, przetwarzania sygnałów, sterowania adaptacyjnego, w robotyce, czy finansach, bankowości, ekonomii, medycynie, inżynierii i innych. Można stwierdzić, że metody sztucznej inteligencji sprawdziły się w zastosowaniach praktycznych w prawie wszystkich dziedzinach nauki i techniki. Generalnie, systemy uczące się można traktować, jako nową technikę obliczeniową, nazywaną również metodami inteligencji obliczeniowej (MIO, ang. computational intelligence methods).

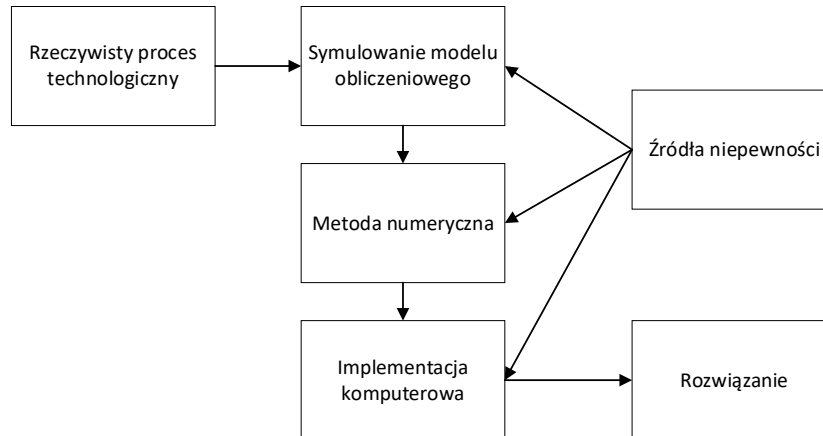
MIO należą do grupy technik modelowania empirycznego, dlatego potrzebują dużej liczby danych pomiarowych, a dodatkowo wspierane są metodami statystycznymi. Inteligentne modelowanie, czyli konstruowanie modelu procesu bazującego na algorytmach uczących się, prowadzi się zwykle dla takich rozwiązań, które są opisywane przez dane. Zadanie inteligentnego modelowania można by sformułować tak: posiadamy zestaw danych (pomiarowych), należy zbudować metodą uczenia adaptacyjnego model, który adekwatnie aproksymuje opisywany przez te dane proces. Jeśli mamy więc tylko odpowiednio dużo, wystarczająco wiarygodnych danych doświadczalnych, (czyli jeśli mamy dobrze opomiarowany proces technologiczny), to wykorzystując np. sztuczną sieć neuronową, ucząc ją, łącząc ewentualnie z innymi

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Katedra Informatyki Przemysłowej

metodami inteligencji obliczeniowej, zbudujemy działający model. Jednak podstawowymi trudnościami związanymi z stosowaniem takich modeli w praktyce jest ich skłonność do nadmiernego dopasowania do danych, niejednoznaczność stworzonego modelu (zarówno, co do architektury, jak i parametrów) oraz brak możliwości zinterpretowania zbudowanego „inteligentnego” modelu procesu. Niestety modele powstałe za pomocą systemów uczących się, podejmując decyzje nie dostarczają wiedzy w postaci zrozumiałej dla człowieka. Trzeba więc, zakodowaną w ich strukturze wiedzę ponownie wydobyć, a to może prowadzić do dodatkowych błędów.

Klasyczne modelowanie matematyczne opiera się dzisiaj najczęściej na zamkniętych, zwykle komercyjnych pakietach oprogramowania zawierających zestawy narzędzi programowych, w postaci skompilowanej, bez dostępu do kodów źródłowych. Prowadzone przy ich użyciu obliczenia numeryczne są z definicji przybliżone. a więc mimo tego, że dążymy do uzyskania rozwiązania dokładnego, rzadko to osiągamy. Błędy (pomijamy tu tzw. błędy "możliwe do uniknięcia", jak pomyłki, błędne wzory, itp.) i inne źródła niepewności muszą być wkalkulowane na każdym etapie modelowania (rys. 1.1).



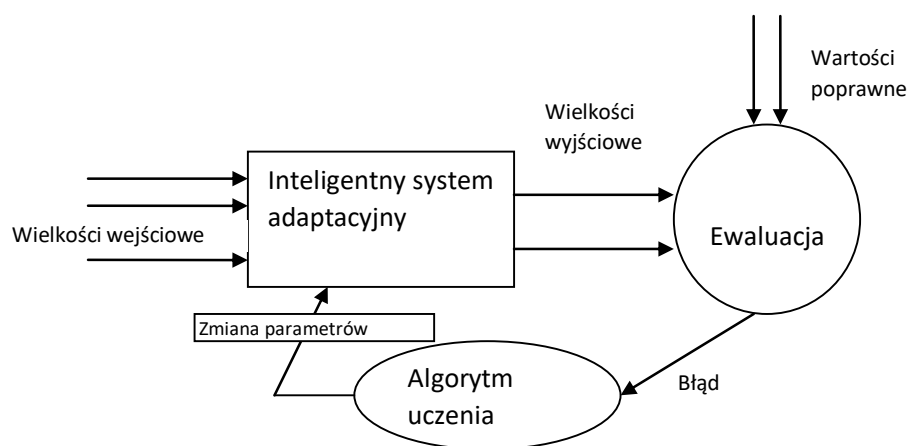
Rys. 1.1. Schemat formułowania modelu z uwzględnieniem źródeł niepewności

Sformułowanie badanego zagadnienia w postaci modelu jest najważniejszą częścią pracy. Najlepsze modele uwzględniają tylko te cechy rzeczywistego problemu, które pozwalają zmniejszyć poziom naszej niepewności do akceptowalnego. Typowym błędem jest przekonanie, że rozszerzenie modelu, uwzględnienie większej ilości zjawisk, prowadzi do dokładniejszych wyników. Przeciwnie, często nadmierne rozbudowanie modelu prowadzi do większych trudności numerycznych, co skutkuje większymi błędami. Model matematyczny nie zawiera tylko równań i związków, ale

również dane z rzeczywistego procesu. Dane te są obarczone błędami i to jest głównym źródłem niedokładności modelu.

Współczesne procesy technologiczne są zwykle w pełni opomiarowane. Setki sensorów i mierników rejestrują zmiany tysięcy parametrów, dostarczając bieżących informacji o przebiegu procesu. Sterowniki programowalne lub analogowe karty pomiarowe przetwarzają te informacje i zapisują je w przemysłowych bazach danych. Po krótkim czasie stosowania pewnej technologii produkcyjnej, można zapełnić te bazy terabajtami danych zebranych z tych procesów, tworzących tzw. „historyczne” informacjami o prowadzonym procesie. Wydobycie tej wiedzy jest konieczne, dla lepszego zarządzania procesem, zmniejszania kosztów wytwarzania, poprawy jakości, czy podejmowania trafniejszych decyzji. Jest to ważne zarówno z utylitarnego, jak i poznawczego punktu widzenia.

Dla rozwiązywania takich zagadnień stosuje się dziś powszechnie na świecie tzw. uczące się systemy adaptacyjne [20] (rys. 1.2), które wykorzystują metody inteligencji obliczeniowej. Wśród tych metod do najważniejszych należą: sztuczne sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i ewolucyjne, algorytmy kolektywnej inteligencji, zbiory rozmyte i przybliżone, algorytmy bazujące na podobieństwie, SVM (maszyna wektorów wspierających), drzewa decyzji i in.



Rys. 1.2. Schemat typowego systemu adaptacyjnego

Ogromny wzrost możliwości przetwarzania i obróbki danych, w tym opracowanie nowych algorytmów i technologii komputerowych zwiększających poziom automatyzacji wydobywania informacji z danych, a także rozwój statystycznych metod uczenia, opracowanie nowych struktur danych i niezwykle efektywnych systemów bazodanowych, połączone z powiększeniem mocy obliczeniowych współczesnych

komputerów (klastry komputerowe i obliczenia równoległe) oraz rozwój sieci komputerowych i możliwości przesyłania danych, stworzyły komplementarnie uzupełniający się zespół okoliczności, pozwalających na nowe podejście do tego, co można zrobić z danymi. Podejście to oparte jest na wydobywaniu użytecznych informacji z baz danych i „inteligentnym” ich przetwarzaniu. Współczesne procesy technologiczne posiadające możliwości zbierania w czasie rzeczywistym ogromnych ilości danych pomiarowych, magazynowania ich w bazach danych procesu, a następnie przetwarzania także w czasie rzeczywistym, w celu adaptacji on-line systemu sterowania procesem technologicznym, dają możliwości zastosowania tego zupełnie nowego podejścia do rozwiązywania problemów przemysłowych. Głównym wyróżnikiem tych metod jest ich stopień automatyzacji, gdyż jednym z celów jest wyeliminowanie z procesu analizy danych ludzi (statystyków, inżynierów), a zastąpienie ich algorytmami uczącymi się. Tak więc współcześnie, w celu stworzenia modelu procesu technologicznego wykorzystuje się zarówno jego podstawy teoretyczne (tzw. wiedzę aprioryczną o badanym procesie), a także dane pomiarowe pochodzące z tego procesu [20]. Celem takiego modelowania jest automatyczne wydobywanie z tych danych, ukrytych i do tej pory niewykorzystywanych informacji o procesie, a następnie użycie ich do jego poprawy.

## **1.2. Neuronowe modelowanie procesu elektro-lukowego wytwarzania stali**

Każdy wytop w piecu łukowym jest odmienny od poprzedniego. Głównie ze względu na stosowany wsad (złom stalowy), którego parametry są bardzo zmienne, ale także ze względu na samą naturę łuku elektrycznego, palącego się między elektrodami a wsadem o stochastycznie zmiennej geometrii. Dlatego modelowanie procesu wytwarzania stali w piecach łukowych wymaga stosowania skomplikowanych modeli o charakterze adaptacyjnym [26, 27]. Utylitarne systemy komputerowe do zarządzania procesem elektrostalowniczym muszą być „inteligentne”, rozumiejące potrzeby mistrza prowadzącego proces i potrafiące sobie radzić z dużą niepewnością danych. Prezentowane tu wybrane wyniki badań zespołu naukowców z Katedry Informatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej koncentrują się na tworzeniu inteligentnego systemu ekspertowego, monitorującego przebieg procesu i wspomagającego podejmowanie decyzji.

W trakcie procesu jest wiele momentów, w których muszą być podejmowane kluczowe decyzje. Np. decyzje, kiedy odsunąć sklepienie i rozładować do pieca kolejny kosz wsadowy. Jeśli za wcześnie (nie wszystko jest stopione), to kolejna porcja złomu

nie zmieści się do pieca. Jeśli za późno, to niepotrzebnie zużyliśmy dodatkową energię. Kolejną, jest decyzja o czasie zakończenia procesu roztopiania w piecu łukowym. Wytop musi mieć odpowiednią temperaturę i skład chemiczny, a do pieca łukowego nie można zajrzeć, aby stwierdzić, czy wszystko jest stopione. Identyfikacja właściwego momentu spustu do pieco-kadzi decyduje o przebiegu procesu LHF. W procesie tym najważniejsze decyzje dotyczą ilości dodatków stopowych, koniecznych do uzyskaniażądanego, końcowego składu chemicznego stali. Ponieważ znany jest wyjściowy (przed rafinacją) skład stali, więc wydawałoby się, że stosując klasyczne modele termodynamiczne, bilanse masowe i energetyczne oraz równowagowe reakcje chemiczne można ten problem rozwiązać. W literaturze zresztą sporo jest prac wykorzystujących te metody do modelowania procesów elektrostalowniczych, ale ich przydatność praktyczna jest znikoma.

Po zakończeniu procesu LHF, stal o określonej temperaturze i składzie chemicznym dostarczana jest na stanowisko ciągłego odlewania (COS). Tu kluczowymi decyzjami są: szybkość wyciągania wlewka oraz takie sterowanie procesem COS, aby uniknąć wad odlewniczych. Po odlaniu, wlewki ciągłe są cięte na żądane odcinki, odpowiednio studzone i magazynowane w celu transportu do klientów. Do sterowania całym, skomplikowanym procesem produkcji stali w Ferrostał Łabędy zbudowano Inteligentny System Ekspertowy (ISE). Głównymi autorami systemu są: prof. Tadeusz Wieczorek, dr hab. inż. Sławomir Golał, dr hab. inż. Roman Przyłucki, dr inż. Marcin Blachnik, dr inż. Grzegorz Kopeć, dr inż. Mirosław Kordos, mgr inż. Reginald Kurzac, dr inż. Magdalena Letun, dr inż. Krystian Mączka, dr inż. Tomasz Maszczyk, dr inż. Marcin Pilarczyk, dr inż. Paweł Świłała [8 – 14]. W systemie tym zaimplementowano algorytmy sztucznej inteligencji, podejmujące kluczowe decyzje w trakcie przebiegu procesu. Ogółem składał się z kilkunastu modułów programowych, o architekturze warstwowej (zastosowano trzy warstwy funkcjonalne: warstwę danych, warstwę logiki systemu, warstwę interfejsu). Są to podsystemy (schematycznie przedstawione na kolejnych rysunkach):

- planowania i harmonogramowania produkcji (rys. 1.3),
- zarządzania przygotowaniem i załadunkiem złomu (rys. 1.4),
- zarządzania procesem EAF (rys. 1.5),
- zarządzania procesem LHF (rys. 1.6),
- zarządzania procesem COS (rys. 1.7),
- zarządzania składowaniem, studzeniem i odbiorem wlewków ciągłych,
- zarządzania dokumentacją i instrukcjami technologicznymi,
- raportowania i analiz ekonomicznych,
- wspomaganie technologii (rys. 1.8).

## Podsystem: Planowanie Produkcji



- Planowanie pracy, przestoju, serwisu, remontów.
- Uwzględnienie awarii urządzeń.
- Określenie czasochłonności czynności i spodziewanego czasu zakończenia poszczególnych etapów procesu.
- Możliwość manualnej korekty planu i nadawanie priorytetu.
- Zmniejszenie strat w procesie produkcyjnym.
- Możliwość zwiększenia zdolności produkcyjnej.
- Obniżenie kosztów wytwarzania.

Rys. 1.3. Interfejs graficzny podsystemu planowania i harmonogramowania produkcji

## Podsystem Złom – Hala Wsadowa

Opis operacji	C	M	P	S	Cz
złom	0.20	0.85	0	0	0
złom	0.85	0	0.15	0.15	0.3

Złom	Opis	Waga [t]
złom	złom	111.00

Rys. 1.4. Interfejs graficzny podsystemu zarządzania przygotowaniem i załadunkiem złomu

## Podsystem: Elektryczny Piec Łukowy

Numer wytopu: A60906  
Etap: Degrebowanie kąpieli

Zużyta energia:  
Etap I: 11.2 [MWh] 280 [kWh/t]  
Etap II: 6.2 [MWh] 325 [kWh/t]  
Etap III: 5.1 [MWh] 285 [kWh/t]  
Degrebowanie: 2.9 [MWh] 157 [kWh/t]  
W sumie: 25.4 [MWh]

Analiza stabilności łuku:  
Wykryte SPOKOJNE palenie się łuku  
Teoretyczna temperatura kąpieli:  
1587 [°C]

Pomiarowy temperatury kąpieli:

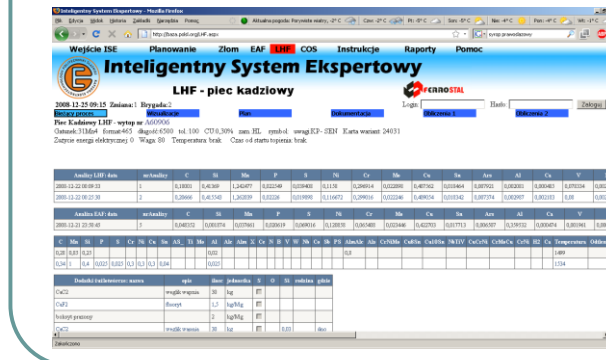
Data pomiaru	Wartość
2008-12-22 09:09:12	1530
2008-12-22 09:25:45	1590

Clas od ostatniego spustu: 53 [min] [min]  
Clas pracy pod podem: 48 [min] [min]

Analiza EAF: data	nr wytopu	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	Ag
2008-12-22 09:33	1	0.1891	0.4339	1.24077	0.022546	0.039403	0.1155	0.296914	0.022098	0.47933	0.018464	0.007921
2008-12-22 09:230	2	0.2066	0.41543	1.26209	0.0226	0.019398	0.116672	0.299162	0.022346	0.48054	0.018342	0.007374

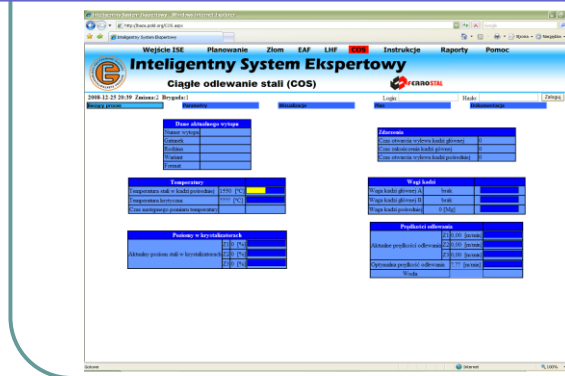
Rys. 1.5. Interfejs graficzny podsystemu zarządzania procesem EAF

## Podsystem: Piec Kadziowy LHF



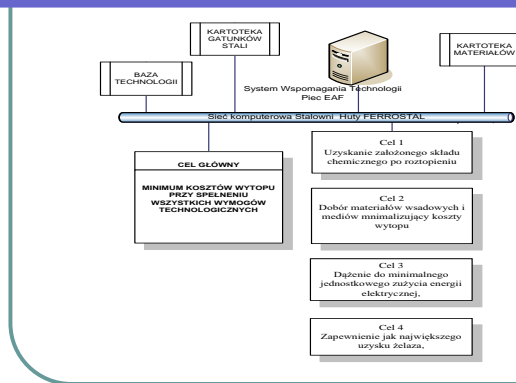
Rys. 1.6. Interfejs graficzny podsystemu zarządzania procesem LHF

## Podsystem COS



Rys. 1.7. Interfejs graficzny podsystemu zarządzania procesem COS

## PODSYSTEM WSPOMAGANIA TECHNOLOGII



Rys. 1.8. Interfejs graficzny podsystemu wspomagania technologii



W podsumowaniu można stwierdzić, że opracowany Inteligentny System Ekspertowy został wykonany zgodnie z przyjętymi założeniami i spełnia podstawowe wymagania, co do dokładności i funkcjonalności.

### **1.3. System ciągłej predykcji temperatury stali i zawartości węgla w kąpeli stalowej w piecu łukowym**

Proces produkcji stali z wykorzystaniem pieca łukowego zwykle składa się z trzech etapów, którymi są: topienie złomu w piecu łukowym (EAF), rafinacja stali w piecokadzi (LHF) oraz ciągłe odlewanie stali (CCS). Zakończenie poszczególnych etapów oraz rozpoczęcie kolejnego wymaga spełnienia szeregu kryteriów, w tym uzyskanie odpowiedniej temperatury spustu (etap EAF), zapewnienie odpowiedniego składu chemicznego, w tym m.in. zawartości węgla w kąpeli stalowej (etap LHF). Ponieważ są to czynniki kluczowe dla rozpoczęcia/zakończenia odpowiedniego etapu, więc pomiary tych parametrów zwykle odbywają się kilkakrotnie w trakcie trwania procesu technologicznego. Każdorazowy pomiar wymaga wyłączenia elektrod oraz palników gazowych i manualnego pomiaru odpowiednich parametrów za pomocą sond, tak iż jednorazowa rejestracja pomiaru trwa około dwóch minut. Powoduje to, iż każdy pomiar łączy się ze znaczącym wzrostem kosztów procesu produkcji, co wydłuża sumaryczny czas potrzebny na pomiary w ciągu jednej doby rzędu 85 min. Są to więc wartości znaczące i redukcja liczby pomiarów istotnie wpływa na obniżenie kosztów produkcji oraz zwiększenie wydajności linii produkcyjnej. Dlatego też zagadnienie to stało się przedmiotem przeprowadzonych badań. W celu rozwiązania tak postawionego problemu postanowiono skorzystać z nowoczesnych metod modelowania bazujących na sztucznej inteligencji, w tym metodach uczenia maszynowego.

Zastosowanie takich rozwiązań nabiera na znaczeniu z uwagi na dostępność dużych ilości danych pomiarowych gromadzonych w trakcie trwania każdego z wytopów. Gromadzone są wówczas zarówno informacje dot. ilości energii, w tym wartości napięć i prądów elektrod pieca łukowego oraz warunków pracy pieca, w tym stan pracy palników gazowych, zaczepek transformatora, poziomu temperatury czynników chłodzących, poziom temperatury obudowy pieca, przybliżony skład wsadu poprzez znajomość gatunków złomu użytego podczas załadunku pieca oraz wartości zarejestrowane w momencie dokonywania pomiarów temperatury oraz składu chemicznego kąpeli stalowej czy też ilości zastosowanych dodatków stopowych. Tak

zgrupowane dane pozwalają na przygotowanie zbioru danych treningowych wykorzystywanego do uczenia modeli predykcyjnych. Całość problemu sprowadza się zatem do rozwiązania trzech problemów: Problem-I – identyfikacja istotnych zmiennych pozwalających na poprawne uczenie, a w konsekwencji poprawne wyniki modelu predykcyjnego, Problem-II odpowiednia adaptacja danych do wymogów wybranego modelu predykcyjnego oraz Problem-III dobór odpowiedniego modelu tzw. problem selekcji modelu [7, 24].

**Problem-I** – przeprowadzone badania wskazały, iż z punktu widzenia budowy modelu predykcyjnego zapewnienie odpowiedniej dokładności predykcji temperatury możliwe jest dopiero po uzyskaniu tak zwanego pomiaru referencyjnego, czyli pierwszego pomiaru temperatury. Wówczas celem modelu predykcyjnego jest wyznaczenie zmiany temperatury w piecu na podstawie takich parametrów, jak czas jaki upłynął od pomiaru, masy oraz gęstości nasypowej złomu, jak również gatunku złomu, ilości dostarczonej energii od momentu pierwszego pomiaru temperatury do momentu predykcji, zmian temperatury obudowy pieca oraz zmian temperatury czynnika chłodzącego. Ostatnią zmienną ważną przy budowie modelu jest wartość bezwzględna zmierzona w pierwszym pomiarze temperatury. W przypadku modelu wyznaczającego ilość dodatków stopowych (tu omówiono na przykładzie węgla) w piecokadzi kluczowe znaczenie miał skład chemiczny kąpielii stalowej zmierzony przez rozpoczęciem etapu rafinacji, ilość dostarczonej energii elektrycznej, czas rafinacji oraz ilość zużytego argonu.

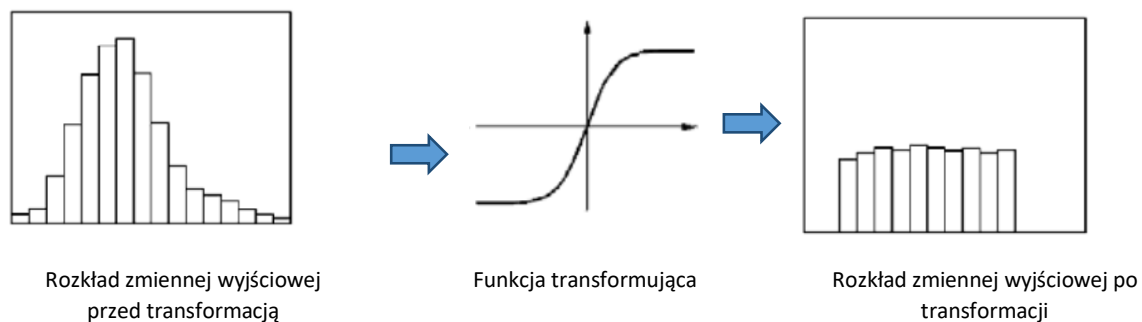
**Problem-II** – przygotowanie danych poprzedzających proces uczenia jest jednym z bardzo istotnych czynników wpływających na jakość modelu predykcyjnego [25]. Istotnym elementem jest tutaj obecność w danych wartości nietypowych i odstających, różny rozkład poszczególnych zmiennych oraz różny zakres zmienności poszczególnych zmiennych, co może negatywnie wpływać na proces uczenia. Dlatego też dla obydwu zbiorów danych zastosowano identyczny proces transformacji danych. W pierwszej kolejności poszczególne zmienne zbioru uczącego zostały poddane standaryzacji, tak aby każda ze zmiennych miała wartość średnią równą zero oraz odchylenie standardowe równe 1. Kolejnym problemem był rozkład poszczególnych zmiennych, w tym również zmiennej wyjściowej (odpowiednio *temperatura* oraz *węgiel*), które cechowały się rozkładem z długimi ogonami, tak iż w zbiorze danych można było znaleźć przypadki, dla których zarejestrowana temperatura była bardzo wysoka (zbliżająca się do 1900°C), podobnie ilość dodanego węgla była bardzo duża oraz przypadki błędów, gdzie temperatura wynosiła 0°C. Wartości takie negatywnie wpływają na proces uczenia, gdyż zwykle są one źródłem bardzo dużych błędów,

co powoduje, iż system uczący koncentruje się na redukcji błędu wprowadzanego przez wartości odstające. W celu eliminacji tego zjawiska wykorzystano transformację danych w oparciu o funkcję sigmoidalną, o postaci:

$$y = \frac{1 - \exp(-\beta \cdot y + \theta)}{1 + \exp(-\beta \cdot y + \theta)} \quad (1.1)$$

gdzie:  $\beta$ ,  $\theta$  współczynniki dobierane adaptacyjnie.

Jej zastosowanie znacząco redukowało wpływ wartości odstających, co przedstawiono na rys. 1.9. Więcej informacji można znaleźć w [3].

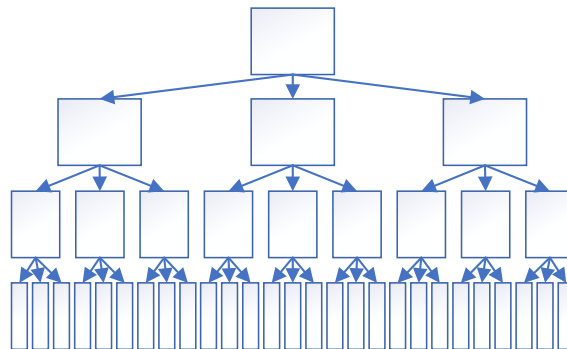


Rys. 1.9. Wpływ transformacji sigmoidalnej na rozkład danych

**Problem-III** - problem doboru modelu predykcyjnego jest również niezmiernie istotny [23]. Przeprowadzone analizy porównawcze, w tym drzew decyzyjnych, lasu drzew oraz sieci neuronowych wskazują, iż najlepsze rezultaty uzyskują sieci neuronowe. W celu ich dalszej poprawy w pracy [4] zaproponowano stworzenie komitetu modeli predykcyjnych. Zaproponowane rozwiązanie polegało na stworzeniu modelu hierarchicznego, tak iż zbiór danych dzielony był na trzy rozłączne podzbiory, następnie każdy z podzbiorów dzielony był na kolejne trzy podzbiory. W rezultacie uzyskano strukturę modelu złożonego przedstawioną na rys. 1.10. Celem takiego podziału modelu było spowodowanie, by każda ze składowych sieci neuronowych mogła dokonać specjalizacji na danym obszarze podprzestrzeni. Jednak aby zapewnić poprawne łagodne przejście pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami, każda z 40 sieci (w sumie zbudowano  $1+3+9+27 = 40$  sieci neuronowych – po jednej dla każdej z podgrup) uczona była na pełnym zbiorze danych (wszystkich wektorach), jednak z uwzględnieniem wag, tak iż każdemu wektorowi dla każdej z sieci niezależnie przypisano wagę wyliczaną wg. zależności:

$$w_j = \max\left(1, c/d\right) \quad (1.2)$$

gdzie  $c$  jest średnią odległością punktów należących do danego klastra od jego środka, natomiast  $d$  jest odległością  $j$ -tego wektora treningowego do środka klastra. Ostateczna decyzja modelu podejmowana jest poprzez ważenie wyników uzyskanych przez każdą z sieci leżącą najbliżej danego wektora testowego (osobno dla każdego z poziomów hierarchii), z uwzględnieniem wag uzyskanych poprzez zastosowanie algorytmu genetycznego połączonego z modułem przeszukiwania kierunku optymalizacji. Więcej szczegółów implementacyjnych można znaleźć w [5].



Rys. 1.10. Struktura hierarchiczna podziału danych do stworzenia komitetu sieci neuronowych

W rezultacie uzyskano wyniki przedstawione w tab. 1.1, dodatkowo rezultaty rozszerzono o rozwiązania uzyskane przez drzewo decyzji, las drzew oraz pojedynczą sieć neuronową MLP.

Tabela 1.1.

Porównanie wyników uzyskanych przez różna modele predykcyjne

	Drzewo decyzji		Las drzew		MLP		Komitet MLP	
	MSE	Std.	MSE	Std.	MSE	Std.	MSE	Std.
Węgiel	0,14	0,017	0,122	0,015	0,118	0,015	0,11	0,011
Temperatura	0,7	0,08	0,6	0,06	0,57	0,09	0,45	0,05

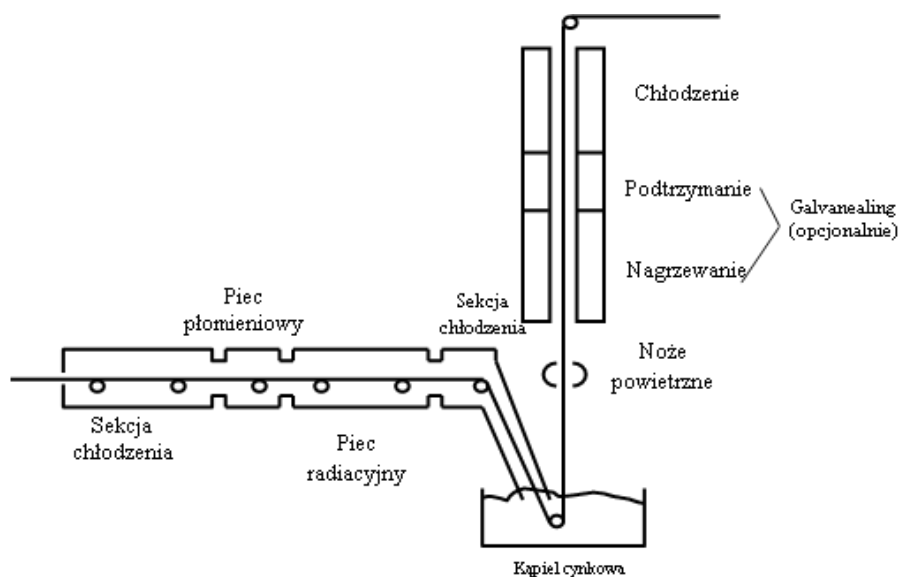
Rozwiązania oparte o sieci neuronowe cechuje duża dokładność predykcji, jednak wadą tych rozwiązań jest brak możliwości interpretacji uzyskanej przez system decyzji. Dlatego też w [6] zaproponowano rozwiązanie pozwalające na wyodrębnianie reguł z nauczonych sieci. Reasumując należy podkreślić, iż zaproponowana w pracy metodologia pozwala na dokładne przewidywanie zarówno ilości dodatków stopowych niezbędnych do uzyskania stali o określonych właściwościach chemicznych na etapie rafinacji stali (LHF), jak również pozwala dokładnie przewidywać temperaturę kąpieli stalowej pieca EAF.

#### **1.4. Wpływ parametrów procesu cynkowania ogniowego na właściwości technologiczne i użytkowe blach głębokotłocznych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych**

Przemysły motoryzacyjny i budowlany, które są głównymi odbiorcami blach, stawiają w warunkach wolnej konkurencji coraz wyższe wymagania w stosunku do ich jakości. Wymagania te dotyczą przede wszystkim tłoczności, wytrzymałości i odporności na korozję. Jedną z najpowszechniej stosowanych metod ochrony antykorozyjnej blach jest cynkowanie ogniowe prowadzone w trybie ciągłym. Technologia ta zyskała dużą popularność z powodu dobrego stosunku właściwości tak wytworzonych blach do całkowitych kosztów ich wytworzenia [29]. W przypadku blach ocynkowanych dodatkowo oprócz wcześniej wymienionych cech wymaga się odpowiedniej odporności powłoki na odkształcenia, a także pożądanego wyglądu jej powierzchni.

Ponieważ materiał wsadowy charakteryzuje się często dużym zróżnicowaniem składu chemicznego oraz historii technologicznej, pojawia się problem takiego doboru wartości parametrów technologicznych, aby uzyskać żądane przez odbiorcę właściwości wyrobu finalnego. Aby tego dokonać należy zbudować pełny model procesu cynkowania ogniowego od wprowadzenia blachy wsadowej aż do uzyskania końcowego wyrobu. W przypadku tak złożonego i wieloetapowego procesu, prowadzonego w warunkach przemysłowych, zbudowanie kompletnego modelu fizycznego jest najczęściej niewykonalne. Jediną możliwością rozwiązania problemu jest zebranie danych pomiarowych z procesu i utworzenie jego modelu empirycznego.

Rys. 1.11 przedstawia schemat analizowanego procesu technologicznego. Po rozwinięciu z kręgu blacha podlega wstępnemu oczyszczaniu. Następnie dodatkowy proces czyszczenia elektrolitycznego usuwa silnie przylegające do powierzchni stali zanieczyszczenia, a blacha jest wprowadzana do stref nagrzewania, wyżarzania i wytrzymańca pieca, gdzie jest wyżarzana powyżej temperatury rekrytalizacji. W atmosferze redukującej  $N_2/H_2$  usuwa się pozostałe zanieczyszczenie organiczne i tlenki powierzchniowe. Po wyjściu z pieca, taśma przechodzi przez sekcje dysz gazowych umożliwiających schłodzenie temperatury blachy przed zanurzeniem do kąpeli cynkowej. Po wynurzeniu blachy z kąpeli grubość warstwy stopionego metalu jest kontrolowana przez noże powietrzne, które usuwają nadmiar metalu powłoki. Powleczona blacha jest schładzana także nadmuchem powietrza. Taśma może zostać dodatkowo poddana obróbce uzupełniającej na walcierce wygładzającej, po czym zostaje ponownie zwinięta w kręgi lub pocięta na arkusze na końcu linii.



Rys. 1.11. Schemat linii cynkowania ogniowego w układzie Sędzimir

Opracowano model empiryczny pozwalający, w oparciu o parametry technologiczne i właściwości wsadu, prognozować wybrane właściwości wyrobu końcowego w postaci blachy ocynkowanej. Ponieważ w procesie występują złożone, trudne do jednoznacznej identyfikacji zależności nieliniowe, w budowie modelu empirycznego zastosowano sztuczne sieci neuronowe [30, 31], z wykorzystaniem algorytmu uczenia nadzorowanego [32].

Jedną z najczęściej wymienianych wad sztucznych sieci neuronowych jest charakter tego narzędzia określanego mianem „czarnej skrzynki”. Problem stanowi interpretacja działania modelu neuronowego. W wyniku procesu uczenia sieć neuronowa gromadzi w swojej strukturze wiedzę o zasadach rządzących modelowanym procesem. Nawet jeżeli sieć pracuje poprawnie, dla danych testowych zwraca zadawalające wyniki, to nigdy nie wiemy, czy utworzony model neuronowy w każdym przypadku będzie pracował poprawnie, nie możemy wyjaśnić zasad jego funkcjonowania, a przede wszystkim skorzystać z zgromadzonej w nim podczas uczenia sieci wiedzy [33].

W ramach badań opracowano algorytm, którego założeniem było wykorzystanie informacji zawartej w strukturze połączeń reprezentowanych przez wartości wag do interpretacji działania modelu stworzonego przy użyciu sztucznej sieci neuronowej i ekstrakcji wiedzy, która została zgromadzona przez sieć w procesie uczenia. Podstawą metody jest stwierdzenie, iż jeżeli pochodna realizowanej przez sieć funkcji po danej składowej wektora  $\bar{X}$  (wejścia sieci) jest w pewnym obszarze przestrzeni wejść różna od zera, to składowa ta ma istotny wpływ na wyjście sieci. Znak pochodnej po wejściu

w danym punkcie przestrzeni wejść oznacza kierunek oddziaływania tego wejścia na wyznaczaną wartość. Wartość wyjścia całej sieci stanowi wynik wielokrotnego składania funkcji przejść poszczególnych neuronów. Jeżeli funkcja przejścia jest ciągła i różniczkowalna to istnieje możliwość obliczenia pochodnych funkcji realizowanej przez sieć neuronową w oparciu o wartości wag połączeń pomiędzy neuronami. Przy założeniu dominacji jednego kierunku oddziaływania danego parametru na wyjście sieci neuronowej miarę siły tego oddziaływania można wyrazić przez średnią wartość pochodnej funkcji neuronowej wyznaczoną na podstawie  $m$  wygenerowanych wektorów wejściowych leżących wewnątrz obszaru wyznaczonego przez dane uczące [18-19].

Na potrzeby badań zebrano 2743 zestawy własności: blachy wsadowej, parametrów technologicznych oraz uzyskanych w tych warunkach właściwości mechanicznych rdzenia blachy wyrażających jej podatność na kształtowanie – wytrzymałości  $R_m$ , granicy plastyczności  $R_e$  oraz wydłużenia  $A_{80}$ . Na bazie tak zebranych danych przeprowadzono uczenie sieci neuronowej. Tabela 1.2 przedstawia uzyskane dokładności prognoz właściwości mechanicznych rdzenia blachy.

Tabela 1.2.

Błędy prognoz właściwości mechaniczne rdzenia blachy

	Błąd bezwzględny	Błąd względny
$R_m$ [MPa]	6,96 MPa	1,79%
$R_e$ [MPa]	8,93 MPa	2,85%
$A_{80}$ [%]	1,64%	5,49%

Weryfikacja utworzonych modeli neuronowych wykazała, że prawidłowo odwzorowują one zależności pomiędzy parametrami technologicznymi, własnościami blachy wsadowej, a finalnymi właściwościami mechanicznymi blachy ocynkowanej. Dzięki temu można przyjąć, że w strukturze sieci neuronowych została w procesie uczenia zakodowana wiedza o modelowanym procesie, która może zostać wykorzystana w dalszej analizie fizycznej procesu.

Celem dalszych prac było określenie przy użyciu opisanej wcześniej metodyki istotności poszczególnych parametrów technologicznych i właściwości wsadu. W tabelach 1.3 – 1.4 przytoczono istotności oraz kierunki oddziaływania czynniki, które zostały wskazane jako posiadające największy wpływ na finalne właściwości mechaniczne blachy.

Tabela 1.3.

Istotności wpływu parametrów na granicę plastyczności  $R_e$ 

Lp.	Parametr	Kierunek	Istotność
1	$c_{Mn(s)}$	+	8,15%
2	$T_{P2}$	-	7,85%
3	$c_{Mo(s)}$	+	7,65%
4	$c_{V(s)}$	+	7,35%
5	$T_{S9}$	-	6,76%
6	$T_{S10}$	-	6,55%
7	$T_{P3}$	-	6,12%
8	$c_{Si(s)}$	+	5,76%
9	$c_{C(s)}$	+	5,52%
10	$T_{P1}$	-	4,56%

Tabela 1.4.

Istotności wpływu parametrów na wytrzymałość  $R_m$ 

Lp.	Parametr	Kierunek	Istotność
1	$c_{Mn(s)}$	+	11,43%
2	$c_{C(s)}$	+	10,54%
3	$T_{S9}$	-	10,05%
4	$c_{Mo(s)}$	+	9,93%
5	$T_{P2}$	-	9,91%
6	$T_{S10}$	-	9,81%
7	$c_{V(s)}$	+	8,48%
8	$T_{P1}$	-	8,19%
9	$T_{P5}$	+	7,45%
10	$c_{As(s)}$	-	6,94%

Dodatni wpływ zawartości manganu  $c_{Mn(s)}$  i węgla  $c_{C(s)}$  na wytrzymałość i granicę plastyczności stali jest w pełni uzasadniony i spodziewany z powodu umacniającego charakteru tych pierwiastków. Dane literaturowe uzasadniają także dodatnie oddziaływanie krzemu  $c_{Si(s)}$ , który rozpuszczając się w ferrycie, zwiększa wytrzymałość stali. W wypadku ujawnienia się wpływu zawartości molibdenu  $c_{Mo(s)}$  i wanadu  $c_{V(s)}$



trudno jest wyjaśnić to zjawisko przy tak niskich zawartościach tych pierwiastków. Przyczyną mogą być niskie odchylenia standardowe tych pierwiastków w analizowanych danych, co przyczyniło się do uznania ich przez zastosowaną metodę ekstrakcji wiedzy za istotne, ponieważ wykorzystuje ona w celach porównawczych normalizację poszczególnych parametrów względem ich odchyłeń standardowych. Preferuje to parametry wykazujące się małym stopniem zmienności w procesie.

Analizując wyniki można zauważyć, że istotny wpływ na finalne właściwości mechaniczne wyrobu wyrażone przez wytrzymałość i granicę plastyczności posiada temperatura blachy w piecu wyżarzania  $T_{P2}$ , temperatury stref pieca wytrzymałości  $T_{S9}$ ,  $T_{S10}$  oraz temperatura blachy w tym piecu  $T_{P3}$  w wypadku granicy plastyczności. W przypadku obu właściwości istotny wpływ ujawnia także temperatura blachy w piecu wstępnym  $T_{P1}$ .

Tabela 1.5.

Istotności wpływu parametrów na wydłużenie  $A_{80}$ 

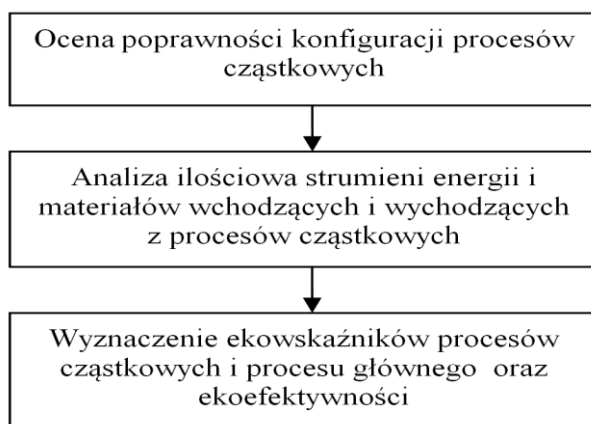
Lp.	Parametr	Kierunek	Istotność
1	$T_{S2}$	-	6,18%
2	$T_{S1}$	-	6,13%
3	$v$	+	5,68%
4	$c_{Al(s)}$	+	5,58%
5	$T_{PS2}$	-	4,32%
6	$c_{P(s)}$	-	4,09%
7	$T_{We}$	+	4,06%
8	$g_B$	-	3,52%
9	$c_{V(s)}$	-	3,49%
10	$T_{P2}$	+	3,43%

Także w wypadku wydłużenia model wskazuje na największy wpływ temperatur w poszczególnych sekcjach pieca (tab. 1.5). Spośród nich największe znaczenie wykazują temperatury stref pieca wstępnego  $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$ ,  $T_{PS2}$ . oraz na dalszej pozycji temperatura blachy w piecu wyżarzania  $T_{P2}$ . Analiza wskazała na istotny wpływ prędkości liniowej blachy  $v$  silnie związanej z czasami przebywania blachy w poszczególnych strefach linii. Temperatura wejścia do kąpielii  $T_{We}$  wyraża intensywność schładzania blachy z temperatury pieca wytrzymałości.

### 1.5. System ekspertowy do oceny efektywności środowiskowej, ekonomicznej i społecznej kopalń węgla kamiennego w Polsce

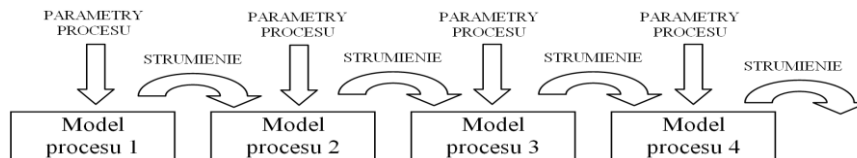
Celem opracowanego systemu ekspertowego zbudowanego w ramach projektu NCBiR „Opracowanie systemu ekspertowego do oceny efektywności środowiskowej, ekonomicznej i społecznej kopalń węgla kamiennego w Polsce” było umożliwienie oceny procesu technologicznego realizowanego w kopalni pod względem jego oddziaływania na środowisko. Ma on służyć jako system wspomagający podejmowanie decyzji przez kadrę zarządzającą na etapie projektowania lub modyfikacji technologii wydobywania węgla w kopalni. Stopień komplikacji systemu, jego nietypowa, heterogeniczna struktura powodują, iż trudne było zastosowanie do jego budowy standardowych narzędzi dostępnych na rynku. Z tego powodu dedykowany system ekspertowy został zbudowany od zera, w oparciu o platformę programistyczną .NET, która dostarcza szerokiego spektrum narzędzi do pracy z danymi przechowywanymi w bazach relacyjnych i w plikach XML, frameworków prezentacyjnych i bardzo szerokiej gamy gotowych bibliotek przydatnych w tworzeniu systemów ekspertowych.

Opracowany system ekspertowy [15–17] charakteryzuje się strukturą warstwową przedstawioną na rys. 1.12. Wyniki dostarczone przez poszczególne warstwy stanowią podstawę realizacji funkcjonalności warstwy następnej. Funkcjonalność realizowana w pierwszej warstwie *oceny poprawności konfiguracji procesów* została zrealizowana w oparciu o klasyczny system ekspertowy wykorzystujący bazę wiedzy zapisaną w formie regułowej. Z uwagi na bardzo zróżnicowany przebieg procesów technologicznego realizowanych w poszczególnych kopalniach, konieczne było zbudowanie wspomnianej bazy wiedzy metodą wywiadów z ekspertami legitymującymi się dobrą znajomością uwarunkowań poszczególnych kopalni.

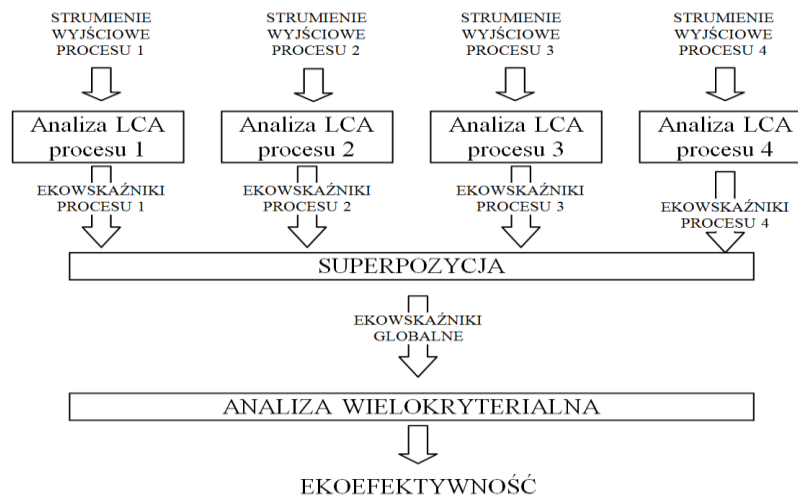


Rys. 1.12. Struktura warstwowa części oceniającej systemu ekspertowego

Warstwa druga jest odpowiedzialna za analizę ilościową strumieni energii i materiałów przetwarzanych przez poszczególne procesy cząstkowe (rys. 1.13). Analiza ta ma na celu wyznaczenie łącznych strumieni przepływających przez globalny proces wydobywania oraz dostarczenie danych niezbędnych do wyznaczenia ekowskaźników [36] w kolejnej warstwie systemu ekspertowego.



Rys. 1.13. Wyjściowe strumienie materiałów i energii na podstawie strumieni wejściowych i parametrów procesów cząstkowych



Rys. 1.14. Wyznaczenie ekowskaźników globalnych i ekoefektywności procesu technologicznego kopalni

Ta część budowanego systemu nie jest już klasycznie rozumianym systemem ekspertowym wykorzystującym jasno wydzieloną bazę wiedzy [35], a jedynie zbiorem inteligentnych modeli obliczeniowych przypisanych każdemu z procesów cząstkowych, które opisują zależności pomiędzy ich strumieniami wejściowymi i wyjściowymi. Ostatnia warstwa systemu (rys. 1.14), realizująca funkcję oceny, opiera się o zestaw zależności łączących wartości strumieni wpływających i wpływających do procesów cząstkowych z wartościami ekowskaźników. Także ta warstwa nie wykorzystuje bazy wiedzy w klasycznym ujęciu. Wykorzystywane zależności to sumy ważone, których współczynniki są wyznaczone za pomocą narzędzi realizujących metodę LCA. Globalne ekowskaźniki dla całego procesu wydobywania stanowią superpozycję wskaźników wyznaczonych dla procesów cząstkowych. W oparciu o obliczone

wartości ekowskaźników i analizę wielokryterialną zostaje wyznaczona ekoefektywność całego analizowanego procesu wydobywania.

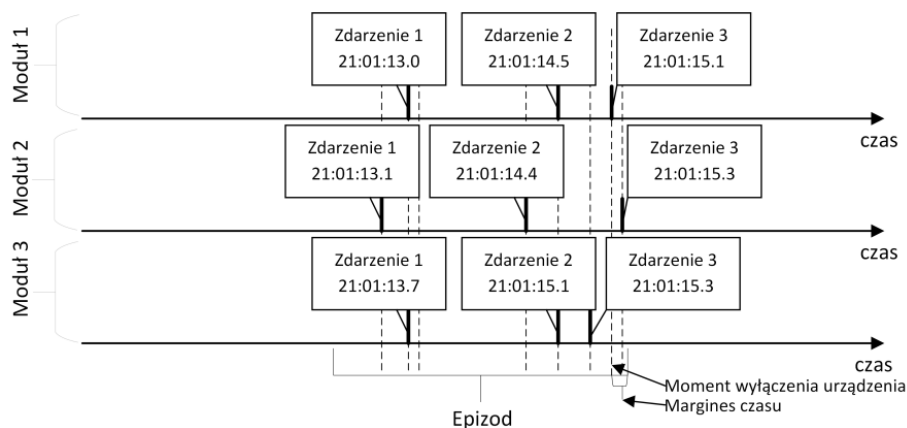
Zbudowany system ekspertowy pozwala na kompleksową ocenę kopalni węgla kamiennego w warunkach polskich. Tę kompleksową ocenę, uwzględniającą zagadnienia techniczne, ekonomiczne, społeczne i środowiskowe, nazwano ekoefektywnością [34]. System uwzględnia aktualną strukturę procesów produkcji węgla kamiennego, opierając się na wiedzy i doświadczeniu ekspertów górniczych oraz na istniejących modelach kopalni, które zostały zaktualizowane, przy uwzględnieniu uwarunkowań funkcjonowania krajowych kopalń węgla kamiennego. Procesy produkcji węgla kamiennego podzielono na cztery główne grupy, do których zaliczono procesy: przygotowawcze, podstawowe, pomocnicze oraz towarzyszące. Procesy te zostały podzielone na 14 procesów jednostkowych. Zestawiono zbiory danych wejściowych i wyjściowych dla poszczególnych procesów, jak również dla całej kopalni, które są niezbędne dla zaprojektowania systemu ekspertowego. Wykonane badania pozwoliły na opracowanie przedstawionego systemu ekspertowego.

## **1.6. Ocena niezawodności i przewidywanie awarii falownika średniego napięcia na podstawie zapisu dziennika błędów**

Celem realizowanych badań, przeprowadzonych na zlecenie jednego z wiodących producentów falowników średniego napięcia, było opracowanie metodologii identyfikacji podobnych scenariuszy awarii falowników na podstawie danych pochodzących z rejestratorów danych umieszczonych w poszczególnych modułach urządzenia.

Każda z klas falowników poddanych analizie charakteryzowała się budową modułową z niezależnym rejestratorem danych zainstalowanym w każdym z modułów. Rejestratory danych odpowiedzialne były za rejestrację zdarzeń typu *ostrzeżenie* oraz *błąd*, skutkiem których mogło dojść do wyłączenia urządzenia. Z punktu widzenia statystycznego rejestrowane dane przyjmują więc postać symboli, gdyż każde z ostrzeżeń i błędów reprezentowane jest przez unikatowy identyfikator opisujący charakter zdarzenia. Okazuje się jednak, iż niemożliwa jest poprawna agregacja danych z poszczególnych rejestratorów urządzenia, co spowodowane jest rozsynchronizowaniem zegarów rejestrujących czasy zajścia zdarzeń w poszczególnych modułach. Do rozsynchronizowania zegarów dochodzi w okresie około tygodnia / kilku tygodni od chwili ich synchronizacji. Powyższe powoduje,

iż zebranych z urządzenia danych nie można traktować jako serii zdarzeń, gdyż integrując je nie jesteśmy w stanie odtworzyć poprawnej ich kolejności. W konsekwencji nie ma możliwości odtworzenia struktury awarii, czyli ustalenia, który z modułów stał się powodem wstrzymania pracy urządzenia, a które błędy były konsekwencją awarii innych modułów. Dlatego też celem prowadzonej pracy była identyfikacja charakterystycznych sekwencji, która umożliwi zidentyfikowanie serii podobnych zdarzeń, prowadzących do wyłączenia urządzenia. Ponieważ wymiernym czynnikiem jest tutaj rejestracja wyłączenia urządzenia, dlatego też właściwym rozwiązaniem jest podział sygnałów na epizody poprzez zastosowanie okna czasowego, którego koniec zaczepiony jest w chwili wystąpienia błędu, natomiast szerokość okna określana jest przez wiedzę ekspercką. Uwzględniając problem rozsynchronizowania się zegarów, koniec okna powinien uwzględniać margines wynikający z maksymalnej możliwej różnicy czasu pomiędzy zegarami modułów. Powyższe przedstawiono na rys. 1.15.



Rys. 1.15. Schemat problemu synchronizacji logów z poszczególnych modułów

Rozwiązanie tak zdefiniowanego problemu pozwala na zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej w celu identyfikacji podobnych epizodów. Wymaga to jednak reprezentacji epizodów w postaci zbioru wektorów o stałej długości. Zaproponowane rozwiązanie polegało na zastosowaniu metodologii słownikowej (ang. bag of events), gdzie wszystkie możliwe do zaobserwowania zdarzenia z wszystkich modułów stanowią bazę słownika, natomiast każdy z epizodów konwertowany jest na zbiór wystąpień wartości słownikowych. Występują tutaj dwa charakterystyczne typy reprezentacji: *Typ I* - zdarzenia, które zaszły w epizodzie oznacza się symbolem „1”, *Typ II* - zliczanie liczby zjść poszczególnych zdarzeń w trakcie trwania epizodu. W efekcie uzyskuje się rozwiązanie, gdzie każdemu z epizodów odpowiada pojedynczy wektor, a powstały zbiór danych reprezentuje

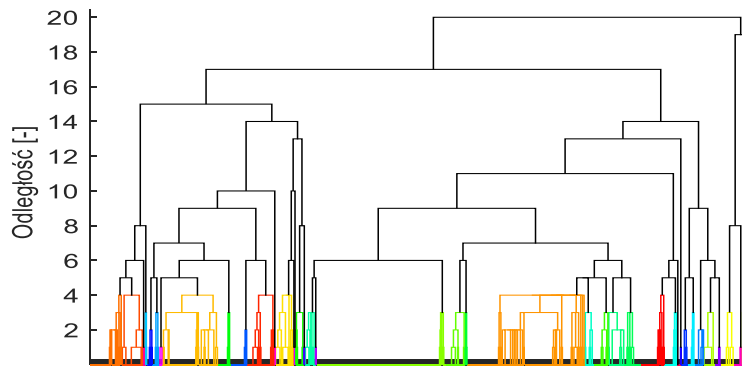
wszystkie z zarejestrowanych epizodów (awarii urządzenia) w każdym z urządzeń określonego typu. Schemat tak powstałego zbioru danych przedstawiono w tab. 1.6 [1].

Tabela 1.6

Przykładowy zbiór danych powstały jak wynik procesu transformacji danych z epizodów do postaci słownikowej. Reprezentacja danych w postaci *typu I*.

Zdarz ID1	Zdarz ID2	Zdarz ID3	Zdarz ID4	Zdarz ID5	Zdarz ID6	Zdarz ID7	Zdarz ID8	...	Zdarz ID M	ID Epizodu
1	0	0	0	0	0	0	1		1	1
0	1	0	0	0	0	0	0		1	2
0	0	0	0	1	1	0	0		1	3
0	0	0	0	1	1	1	0		1	4
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	1	1	0	0		1	n

W celu identyfikacji zdarzeń o podobnym charakterze wykorzystano algorytm grupowania hierarchicznego [2]. Jest to standardowy algorytm, który wyodrębnioną strukturę zależności reprezentuje w postaci drzewa zwanego dendrogramem. Jego zastosowanie w niniejszym projekcie ma szereg zalet – jest on niezależny od inicjalizacji, a tym samym deterministyczny, nie wymaga wstępnego określenia liczby klastrów (jak w przypadku algorytmu k-średnich) oraz pozwala na wizualizację wydobytej wiedzy w postaci wspomnianego dendrogramu. Algorytm ten ma dwa podstawowe parametry konfiguracyjne, którymi są metoda linkowania oraz miara odległości. W przypadku funkcji linkowania wykorzystano funkcję całkowitego połączenia (ang. complete linkage). Celem jej zastosowania była możliwość określenia maksymalnej różnicy pomiędzy epizodami występującymi w trakcie działania poszczególnych falowników, gdyż różnica pomiędzy wartościami odległości Hamminga [21] odpowiada liczbie różnic między epizodami. Powyższe występuje, gdy zastosowany jest *typ-I* reprezentacji słownikowej. Inną możliwą do wykorzystania miarą odległości jest odległość Jaccarda [22]. Gdy zastosowanie ma reprezentacja danych *typu-II*, konieczna jest adaptacja miary odległości. W pracy zaproponowano miarę będącą modyfikacją miary odległości Jaccarda. Przykładowy dendrogram wraz z podziałem na klastry o maksymalnej różnicy 4 zdarzeń przedstawiono na rys. 1.16.



Rys. 1.16. Dendrogram uzyskany w wyniku przeprowadzenia grupowania 3840 epizodów. Kolorami oznaczono podział na klastry, w których różnica między epizodami wynosiła maksymalnie 4 zdarzenia

Zaproponowane rozwiązanie identyfikuje zatem rekordy podobne, co umożliwia dalszą analizę przeprowadzaną przez ekspertów. Realizowane jest to poprzez weryfikację epizodów znajdujących się w poszczególnych klastrach, przy czym determinującym czynnikiem jest tutaj rozmiar klastra, tak iż analizie podlegają jedynie klastry o odpowiednio dużym rozmiarze.

## Bibliografia

1. Sipos, Ruben, et al. Log-based predictive maintenance, Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining. ACM, 2014.
2. Murtagh, Fionn, a survey of recent advances in hierarchical clustering algorithms, The Computer Journal 26.4, 1983, 354-359.
3. Kordos M., et al., a hybrid system with regression trees in steel-making process, International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
4. Kordos M., Blachnik M., Wiczorek T., Neural Network Committees Optimized with Evolutionary Methods for Steel Temperature Control, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 6922, 2011, pp. 42-51.
5. Kordos M., Blachnik M., Wiczorek T., Temperature Prediction in Electric Arc Furnace with Neural Network Tree, Lecture Notes in Computer Science, vol. 6792, 2011, pp. 71-78.
6. Kordos M., Kania P., Budzyna P. Blachnik M., Wiczorek T., Golak S., Combining the Advantages of Neural Networks and Decision Trees for Regression Problems in

- a Steel Temperature Prediction System, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 7209, 2012, pp. 36-45.
7. Blachnik M., Kordos M., Wieczorek T., Golak S. Selecting Representative Prototypes for Prediction the Oxygen Activity in Electric Arc Furnace, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 7267, 2012, pp. 539-547.
  8. Wieczorek T., Intelligent control of the electric-arc steelmaking process using artificial neural networks, Computer Methods in Material Science, vol. 6, (1), 2006, pp. 9-14.
  9. Wieczorek T., Blachnik M., Mączka K., Building a model for time reduction of steel scrap meltdown in the electric arc furnace (EAF). General strategy with a comparison of feature selection methods, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 5097, 2008, pp. 1149-1159.
  10. Wieczorek T., Mączka K., Modeling of the AC-EAF process using computational intelligence methods, Electrotechnical Review 11, 2008, pp. 184-188.
  11. Wieczorek T., Blachnik M., Mączka K. Modelowanie procesu roztopiania złomu w piecu łukowym z wykorzystaniem sieci neuronowych i algorytmów SVM. w: Informatyka w technologii metali, Grosman F., Hyrcza-Michalska M. (ed.) Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2008, s. 161-168.
  12. Wieczorek T., Świtłała P., System predykcji dodatków stopowych w procesie stalowniczym, Studia Informatica, vol. 31, nr 2B(90), 2010, s. 425-437.
  13. Wieczorek T., Kordos M., Neural Network-based Prediction of Additives in the Steel Refinement Process, Computer Methods in Material Science, vol.6, no 1, 2010, pp. 9-14.
  14. Blachnik M., Mączka K., Wieczorek T., a model for temperature prediction of melted steel in the electric arc furnace (EAF), Lecture Notes in Computer Science, vol.4839, 2010, pp.371-378.
  15. Golak S., Burchart-Korol D., Czaplicka-Kolarz K., Wieczorek T., Application of Neural Network for the Prediction of Eco-efficiency, Lecture Notes in Computer Science, vol. 6677, 2011, pp. 380-387.
  16. Golak S., Wieczorek T., Koncepcja systemu ekspertowego do oceny i poprawy efektywności kopalni węgla kamiennego, Studia Informatica, vol 35, no 2(116), 2014, s. 213-222.
  17. Wieczorek T., Golak S., Przyłucki R., Pilarczyk M., Innowacyjny system ekspertowy do oceny kopalń węgla kamiennego, Logistyka nr 5, 2015, s. 645-650.



18. Wieczorek T., Golak S., An algorithm of knowledge extraction from trained neural networks. *Advances in soft computing*, Springer, Berlin Heidelberg New York, 2004, pp. 470-475.
19. Grosman F., Wieczorek T., Golak S., Próba interpretacji procesu cynkowania ogniowego w oparciu o parametry struktury nauczonej sieci neuronowej. *X Międzyn. Konf. KomPlasTech 2003*, Wisła, s. 11-19.
20. Wieczorek T., *Neuronowe modelowanie procesów technologicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, s. 237.
21. Norouzi M., Fleet D.J., Salakhutdinov R.R. (2012). Hamming distance metric learning. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 1061-1069).
22. Ferdous R., An efficient k-means algorithm integrated with Jaccard distance measure for document clustering. In *2009 First Asian Himalayas International Conference on Internet 2009*, IEEE., s. 1-6.
23. Claeskens G., Hjort NL., *Model selection and model averaging*. Cambridge Books. 2008.
24. Barbieri MM, Berger JO., Optimal predictive model selection. *The annals of statistics*. 2004;32(3) s. 870-97.
25. García S., Luengo J., Herrera F., Tutorial on practical tips of the most influential data preprocessing algorithms in data mining. *Knowledge-Based Systems*. 2016, 98, s. 1-29.
26. Zhang Z., Fahmi NR., Modelling and analysis of a cascade 11-level inverters-based SVG with control strategies for electric arc furnace (EAF) application. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*. 2003,1;150(2) s. 217-23.
27. Janabi-Sharifi F., Jorjani G., An adaptive system for modelling and simulation of electrical arc furnaces. *Control Engineering Practice*. 2009, 17(10) s. 1202-19.
28. Chang G.W., Shih M.F., Chen Y.Y., Liang Y.J., A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013, 29(2) s. 815-24.
29. Azzeri N., Industrial requirements on metal hot-dip coating, air knife and bath equipment technology, *Metallurgica Italiana*, v. 90, nr 5, 1998, s. 55-61.
30. Bhadeshia H.K.D.H., Neural networks in material science, *ISIJ International*, v. 39, nr 10, 1999, s. 966-978.
31. Kusiak J., Wybrane przykłady zastosowania sztucznych sieci neuronowych w inżynierii materiałowej i metalurgii, *NeuroMet 97*, Kraków 1997, s. 61-72.

32. Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalkar A., Foundations of machine learning, MIT Press 2012
33. Bondarenko, A., Aleksejeva, L., Methodology for knowledge extraction from trained artificial neural networks, Information Technology & Management Science, nr 12, 2018.
34. Burchart-Korol D., Ekofektywność-nowym kryterium oceny systemu produkcyjnego, Logistyka, nr 6, 2012.
35. Wakulicz-Deja A., Nowak-Brzezińska A., Przybyła M., Systemy ekspertowe, EXIT 2012.
36. Śliwińska A., Burchart-Korol D., Korzyści z zastosowania metody oceny cyklu życia (LCA) do oceny środowiskowej kopalni węgla kamiennego, Wasztaty 2014: Górnictwo – człowiek – środowisko: zrównoważony rozwój, s. 364-378.

## List of figures

- Fig. 1.1. Model formulating having regard to the sources of uncertainty.
- Fig. 1.2. Schema of a typical adaptive system.
- Fig. 1.3. GUI of production planning and scheduling subsystem.
- Fig. 1.4. GUI of the preparation and loading of scrap metal subsystem.
- Fig. 1.5. GUI for managing of the EAF process subsystem.
- Fig. 1.6. GUI for managing of the LHF process subsystem.
- Fig. 1.7. GUI for managing of the CSC process subsystem.
- Fig. 1.8. GUI of the technology support subsystem.
- Fig. 1.9. The influence of sigmoidal transformation on the data distribution.
- Fig. 1.10. The hierarchical structure of the data division to create a neural network committee.
- Fig. 1.11. Diagram of the hot dip galvanizing line in the Sędzimir system.
- Fig. 1.12. A layered structure of the expert system evaluation part.
- Fig. 1.13. Output streams of materials and energy based on input streams and partial process parameters.
- Fig. 1.14. Determination of global eco-indicators and eco-efficiency of the mine's technological process.
- Fig. 1.15. Scheme of logs synchronization from individual modules.
- Fig. 1.16. Dendrogram obtained as a result of grouping 3840 episodes. The colors are marked as clusters, in which the difference between episodes was a maximum of 4 events.

Jacek PIEPRZYCA<sup>1</sup>, Tomasz MERDER<sup>1</sup>, Mariola SATERNUS<sup>1</sup>,  
Bogdan PANIC<sup>2</sup>,

## Rozdział 2

# ZARYS ROZWOJU BADAŃ MODELOWYCH PROCESÓW METALURGICZNYCH

### 2.1. Wprowadzenie

Procesy technologiczne wytapiania, rafinacji i odlewania metali charakteryzują się złożoną naturą. Zachodzące w ich trakcie zjawiska podporządkowane są prawom zapisanym w wielu dziedzinach nauki. Fizyka, chemia, termodynamika, mechanika płynów to tylko podstawowe z nich. Znajomość tych zjawisk ma decydujący wpływ na możliwości kontroli prowadzonego procesu oraz jego skuteczność z punktu widzenia oczekiwanych rezultatów. W związku z tym wprowadzanie w nich zmian, mających na celu zastosowanie rozwiązań innowacyjnych, wymaga precyzyjnej identyfikacji czynników determinujących przebieg zachodzących w trakcie ich trwania zjawisk. Z tego powodu kluczowe znaczenie mają badania prowadzone w warunkach przemysłowych. Dzięki postępowi w dziedzinie metrologii oraz zastosowaniu nowoczesnej aparatury pomiarowej, możliwe jest obecnie prowadzenie pomiarów biegnącego procesu w bardzo trudnych warunkach fizycznych. Jednak często, szczególnie w metalurgii, identyfikacja zjawisk metodami bezpośrednimi z oczywistych powodów jest niemożliwa. Tymi powodami są: wysoka temperatura sięgająca 2000°C, agresywne środowisko kąpieli metalowej, izolowanie przestrzeni roboczej reaktorów metalurgicznych od wpływu otoczenia, czynniki związane z niezakłóconym przebiegiem procesu w trakcie prowadzonych badań i co ma szczególne znaczenie bezpieczeństwem badaczy prowadzących pomiary. W związku z tym konieczne dla

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Katedra Metalurgii i Recyklingu,

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Produkcji

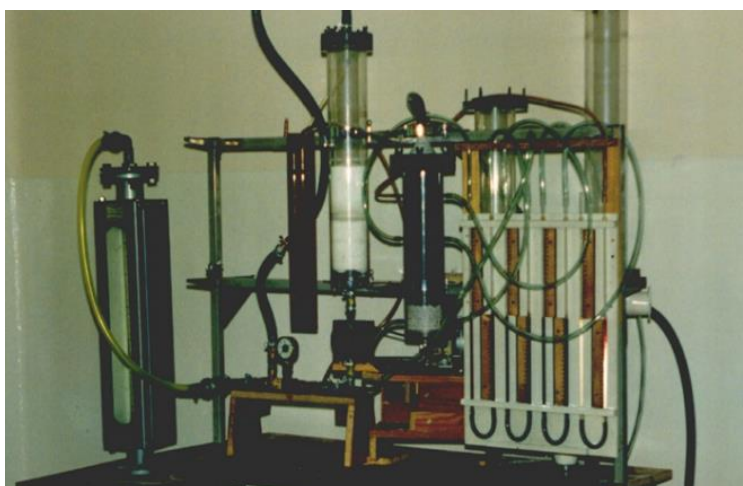
rozwoju prowadzonych technologii informacje należy uzyskiwać innymi metodami. Doskonale do tego celu nadają się techniki modelowania.

Na przestrzeni 50 lat istnienia Wydziału Inżynierii Materiałowej do badań procesów metalurgicznych wykorzystywano metody modelowania. Początkowo wykorzystywano głównie modelowanie fizyczne. Wraz z rozwojem technik informatycznych zaczęto stosować również symulacje numeryczne. Obecnie te dwie metody wykorzystuje się łącznie pod nazwą modelowania hybrydowego.

We wstępie do tego rozdziału przytoczono kilka wspomnień z dotychczasowych działań w tym zakresie, które na początku miały charakter pionierski, a obecnie zaowocowały powstaniem Laboratorium Badań Modelowych, które jest ośrodkiem rozpoznawalnym nie tylko w kraju, ale i zagranicą.

Wspomnienia te podzielono na trzy etapy. Pierwszy z nich to etap badań modelowych dotyczących przepływu gazu z pyłem przez złożę kawałkowe, odnoszących się do modelowania procesów zachodzących w metalurgicznym piecu szybowym, a szczególnie wielkim piecu. Dalej to etap badań procesów stalowniczych, a końcowy etap to modelowanie procesu rafinacji aluminium.

Budowę prostych modeli fizycznych pieca szybowego zainicjowano już w latach 70-tych ubiegłego wieku. Jednak istotny rozwój tej działalności przypada na lata 90-te. Wówczas, dla realizacji badań przepływu przez złoża kawałkowe gazu obciążonego pyłem postanowiono wybudować kompleksową instalację badawczą wykorzystując dotychczasowe doświadczenia. Zaprojektowaną i wykonaną instalację pomiarową ilustruje rys. 2.1.



Rys. 2.1. Widok modelu fizycznego pieca szybowego

Konstruując instalację podjęto próbę dostosowania podstawowych parametrów geometrycznych i kształtu aparatury do urządzeń stosowanych w przemyśle.

Podstawową część instalacji stanowiła dzielona kolumna z PMMA. Różnice ciśnień mierzone były wzdłuż wysokości złoża, za pomocą u-rurek. Dodatkowo pomiaru ciśnienia dokonywano w górnej części złoża. Jako gazu używano powietrza, które podawane było do instalacji ze stałą wartością objętościowego natężenia przepływu, mierzoną rotametrem. Zawór redukcyjny utrzymywał stały przepływ gazu w trakcie pomiaru. Pył ze zbiornika dozowany był poprzez podajnik celkowy do przewodu i zasysany przez płynące nim powietrze.

Opisana instalacja umożliwiała prowadzenie badań w warunkach nieruchomego złoża kawałkowego. Ponieważ w szybowych agregatach metalurgicznych procesy fizykochemiczne zachodzą w przeciwnym kierunku, co oznacza, że przebiegają przy przepływie gazu reakcyjnego w górę przez materiały wsadowe schodzące w dół, a ruchome złożo może w istotny sposób zmieniać warunki przepływu gazu, podjęto próbę przeprowadzenia badań dwufazowego przepływu (gaz-pył) przez schodzące złożo kawałkowe. W związku z tym, uzyskane podczas budowy pierwszej instalacji doświadczenia, postanowiono wykorzystać do realizacji dalszych badań i skonstruowano model fizyczny przepływu dwufazowego gaz – pył przez ruchome (schodzące) złożo kawałkowe. Widok tej instalacji przedstawiono na rys. 2.2.

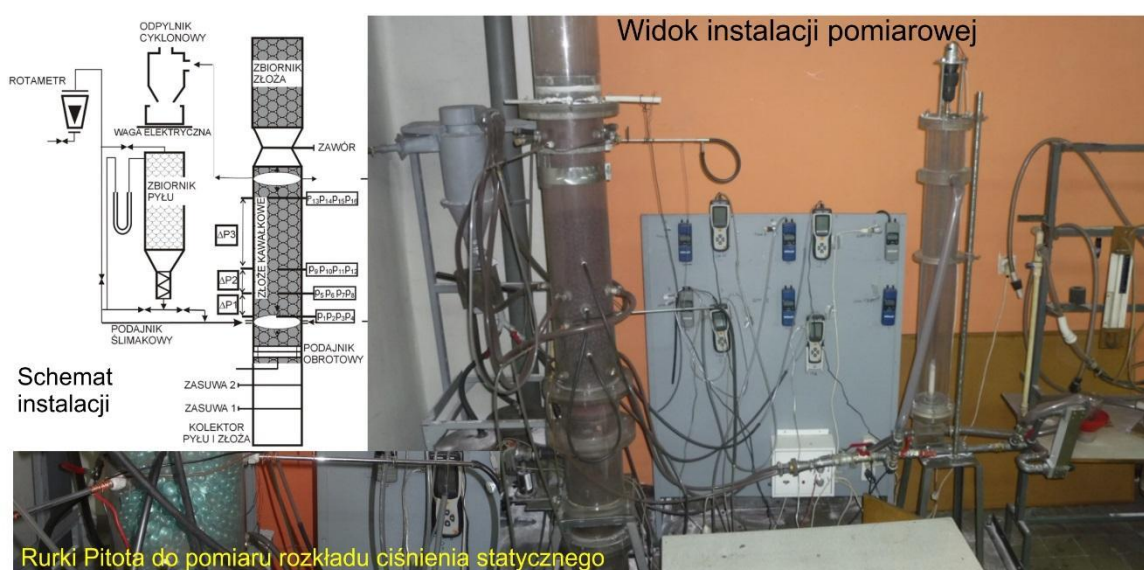


Rys. 2.2. Widok ogólny instalacji pomiarowej

Schodzące złożo, składające się z kul szklanych lub kul wysokoglinowych na bazie  $Al_2O_3$ , lub z grudek wielkopieczowych, wypełniało kolumnę z PCV o średnicy wewnętrznej 114 mm i wysokości badawczej 350 mm (wysokość pomiędzy dyszami wlotowymi a króćcami wylotowymi gazu). Ruch fazy stałej był wymuszony przez ciągłe usuwanie kawałków złoża za pośrednictwem znajdującego się w dolnej części kolumny podajnika ślimakowego. Spadek ciśnienia wzdłuż wysokości złoża był

mierzony przy użyciu zestawu manometrów różnicowych, rozłożonych wzdłuż wysokości kolumny. Jako gazu używano powietrze, które podawano do instalacji ze stałym objętościowym natężeniem przepływu, kontrolowanym przez rotametr. Ilość podawanego pyłu dozowano przez podajnik ślimakowy. Pył w strumieniu gazu wprowadzano do złoża przez cztery dysze znajdujące się na obwodzie kolumny. Gaz z pyłem opuszczający kolumnę (cztery króćce wylotowe) kierowany był do odpylnika cyklonowego.

Przeprowadzone badania eksperymentalne w sposób niewystarczający uwzględniały zmiany charakterystyki złoża i pyłu oraz zmiany wielkości wolnych przestrzeni złoża wzdłuż promienia i wysokości reaktora. Dlatego zaprojektowano i skonstruowano trzecią generację instalacji badawczej przepływu dwufazowego gaz – pył przez ruchome, schodzące złoże kawałkowe. Instalacja ta, po bieżących ulepszeniach i uzupełnieniach o nowoczesną aparaturę kontrolno-pomiarową oraz obudowaniu informatycznym wykorzystywana jest do dzisiaj. Widok tej instalacji przedstawiono na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Widok instalacji trzeciej generacji

Podczas badań ruch złoża kawałkowego jest wymuszany przez ciągłe usuwanie części złoża za pośrednictwem znajdującego się w dnie podajnika ślimakowego. Podajnik ten umożliwia odbiór złoża na obwodzie kolumny, co powoduje, że zachodzi odwzorowanie występującego w agregatach przemysłowych „martwego słupa cząstek złoża” czyli tzw. strefy stagnacji.

Próby wykorzystywania technik modelowania fizycznego procesów stalowniczych na Wydziale podejmowano już na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Dotyczyły one głównie modelowania procesów krzepnięcia

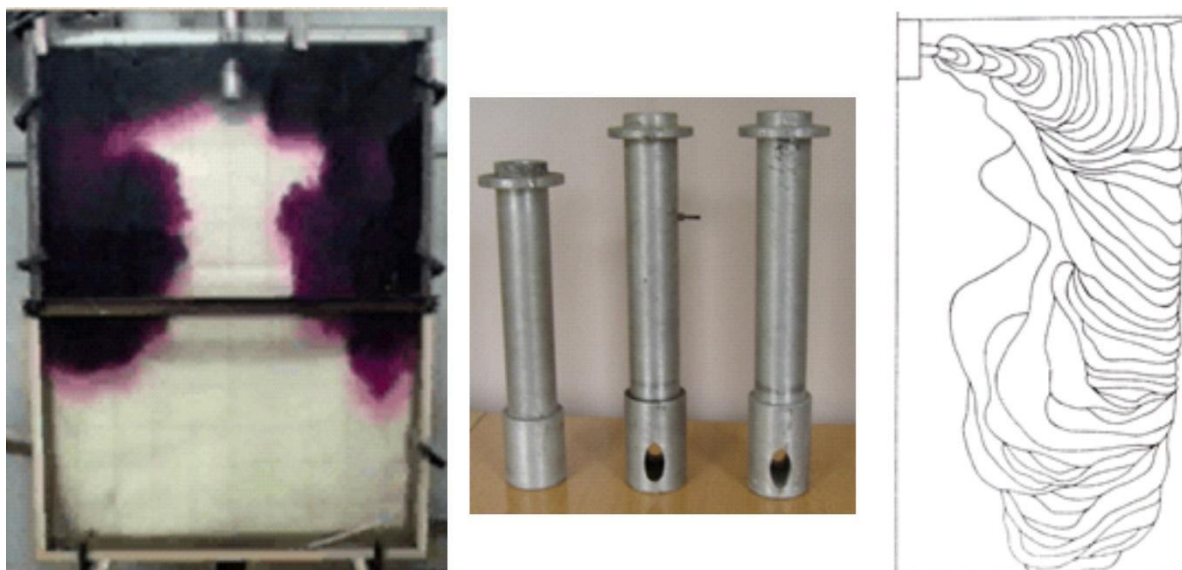
wlewków, początkowo odlewanych metodą tradycyjną, a później metodą ciągłą. Żeliwne modele wlewnic napelniano ciekłą parafiną modelującą stal. W rezultacie tych badań określano kinetykę krzepnięcia wlewków. Widok stanowiska badawczego przedstawia rys. 2.4.



Rys. 2.4. Stanowisko badawcze do określania kinetyki krzepnięcia tradycyjnych wlewków stalowych

Rozwinięciem tego stanowiska było inne, wyposażone w modele wlewnic wykonane z PMMA dla umożliwienia obserwacji procesu krzepnięcia. Czynnikiem modelującym stal był tiosiarczan sodu ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Stanowisko to pozwalało na obserwację przemieszczania się frontu krzepnięcia, określenie jego kinetyki i analizę powstawania struktury pierwotnej wlewków.

Znaczące jednak instalacje zaczęły powstawać w latach osiemdziesiątych. Jedną z pierwszych był wodny model fizyczny krystalizatora urządzenia COS. Wodny, ponieważ ciekła stal reprezentowana jest w nim przez wodę. Model ten powstał w oparciu o podstawowe zasady teorii podobieństwa. Umożliwiał wizualizację sposobu mieszania się ciekłej stali w krystalizatorze w zależności od konstrukcji zainstalowanego w nim modelu wylewu zanurzeniowego dzięki zastosowaniu znacznika w postaci wodnego roztworu  $\text{KMnO}_4$ . Widok prowadzonych doświadczeń, modeli wylewów zanurzeniowych oraz wykres kinetyki przepływu cieczy modelowej ilustruje rys. 2.5.



Rys. 2.5. Widok modelu krystalizatora, wylewów zanurzeniowych oraz wykres kinetyki przepływu cieczy modelowej

Ciekawą rzeczą jest sposób obróbki uzyskiwanych rezultatów badań. Przebieg doświadczenia rejestrowano za pomocą kamery video, popularnego wówczas systemu VHS. Następnie na ekran telewizora, na którym wyświetlano zarejestrowany materiał filmowy, naklejano arkusz kalki technicznej. Film odtwarzano sekunda po sekundzie rysując na niej ołówkiem linie frontu przemieszczającego się znacznika. Należy przyznać, że była to benedyktyńska praca.

W latach osiemdziesiątych został zbudowany unikatowy model wodny konwertora tlenowego. Model ten wykonano z PMMA w skali liniowej 1:10. Model ten wykorzystywany jest do dnia dzisiejszego. W pierwszej jego postaci pomiary sposobu mieszania się cieczy modelowej rejestrowano stosując jako znacznik czynnik zmieniający zasadowość i stosując czujniki w postaci pH-metrów. Pomiar ten charakteryzował się jednak małą dokładnością ze względu na inercję takiego układu oraz problemy z zarastaniem czujników krystalizującym na ich powierzchni znacznikiem. W późniejszym okresie czujniki te wymieniono na konduktometry, a jako znacznik zaczęto stosować wodny roztwór NaCl. Widok modelu przedstawia rys. 2.6 a. Model ten umożliwia prowadzenie badań w bardzo szerokim zakresie. Wyposażony jest w wymienne dysze głowicy lancy tlenowej, co umożliwia wizualizację wpływu ukierunkowania wdmuchiwanego strumienia gazu na powierzchnie cieczy modelowej. W dnie modelu konwertora zainstalowano system dysz w różnej konfiguracji, umożliwiającą prowadzenie badań przebiegu procesu z dmuchem kombinowanym.



W tym okresie rozpoczęto również prace związane z modelowaniem procesów kadziowych. Powstały wówczas pierwsze modele kadzi stalowniczych, w których badano zjawiska zachodzące podczas procesu argonowania (rys. 2.6 b). W późniejszych latach również tę działalność rozwinęto i dzisiaj w Laboratorium Badań Modelowych istnieje kilka stanowisk do tego typu badań.



Rys. 2.6. A) Widok modelu wodnego konwertora tlenowego, B) model kadzi stalowniczej

Na przełomie wieków XX i XXI w polskim przemyśle stalowym nastąpił gwałtowny rozwój metody ciągłego odlewania stali. Spowodował on wzrost zainteresowania ze strony przemysłu badaniami modelowymi tego procesu.

W roku 1998 rozpoczęto budowę pierwszego kompleksowego modelu fizycznego urządzenia COS. Widok tego modelu przedstawia rys. 2.7. Na rysunku tym szczególną uwagę zwracają niebieskie beczki zastosowane jako modele kadzi stalowniczych. Z biegiem czasu stały się one podstawową cechą identyfikującą ten model. Należy jednak wspomnieć, że uwzględniając doświadczenia związane z rejestracją zjawisk zachodzących w modelu konwertora tlenowego za pomocą pH-metrów, w modelu urządzenia COS zastosowano nowatorskie rozwiązanie w postaci czujników optoelektrycznych. Zmianę stężenia znacznika rejestrowały one na podstawie zmiany jego barwy. Charakteryzowały się bardzo wysoką czułością oraz praktycznie brakiem inercji. W związku z tym rezultaty uzyskiwano w czasie rzeczywistym prowadzonego eksperymentu. Układ ten wyposażono dodatkowo w bardzo precyzyjny system kalibracji tych czujników, co umożliwiło unifikację pomiaru na wszystkich wylewach. Wadą tego modelu było jednak to, że był on dedykowany tylko jednemu urządzeniu przemysłowemu.



Rys. 2.7. Widok pierwszego modelu kompleksowego urządzenia COS

Kolejnym rozwiązaniem było stanowisko do modelowania zjawisk przepływu ciekłej stali w urządzeniu COS, w którym możliwa była łatwa wymiana modelu kadzi pośredniej, czyli segmentu głównego. Wówczas też powstały modele kadzi pośrednich w zasadzie wszystkich urządzeń pracujących w Polsce. Widok tego stanowiska przedstawia rys. 2.8.



Rys. 2.8. Widok drugiego modelu kompleksowego urządzenia COS

W roku 2016 w Laboratorium Badań Modelowych przeprowadzono generalny remont. Wymieniono praktycznie całkowicie instalację wodnokanalizacyjną przystosowując ją do potrzeb nowoczesnego laboratorium. Wymieniono również instalację elektryczną, lokalizując wszystkie źródła prądu w ten sposób by zapewnić warunki bezpieczeństwa w razie rozszczelnienia zainstalowanych w laboratorium

modeli. Zastosowano również mobilne źródła zasilania umożliwiające podłączenie niezbędnej aparatury w dowolnym miejscu laboratorium.

W tym czasie przystąpiono również do budowy najnowszego stanowiska badawczego do modelowania zjawisk zachodzących podczas procesu ciągłego odlewania stali. Instalacja ta odpowiada najnowszym wymaganiom stawianym tego typu stanowiskom i jest całkowicie zautomatyzowana. Jego opis znajduje się w dalszej części rozdziału w niniejszej monografii.

W rezultacie powstało bardzo nowoczesne laboratorium modelowe, umożliwiające prowadzenie badań w pełnym zakresie technologii prowadzonych w przedsiębiorstwach hutniczych. Zakres ten obejmuje: zjawiska zachodzące podczas wytapiania surówki żelaza w wielkim piecu, zjawiska zachodzące w trakcie wytapiania stali w konwertorze tlenowym, zjawiska zachodzące podczas obróbki pozapiecowej stali – zarówno w piecokadzi, jak i obróbki próżniowej na urządzeniu RH i wreszcie zjawiska zachodzące podczas odlewania stali metodami tradycyjnymi, a przede wszystkim w urządzeniu do ciągłego odlewania stali. Widok obecnie działającego laboratorium przedstawiono na rys. 2.9 i 2.10.

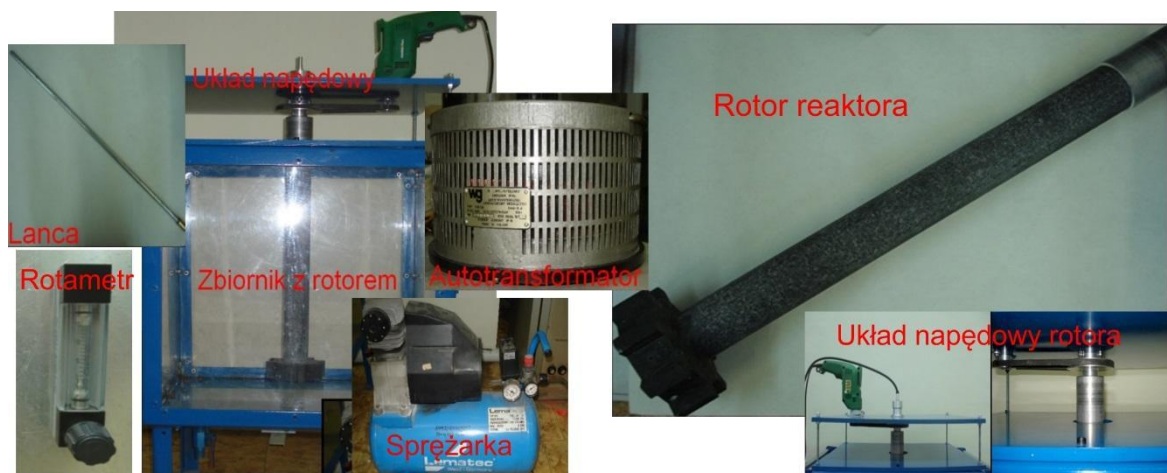


Rys. 2.9. Część Laboratorium Badań Modelowych procesów wytapiania i rafinacji stali



Rys. 2.10. Część Laboratorium Badań Modelowych procesu ciągłego odlewania stali

W ostatnim czasie laboratorium wzbogacono o modele fizyczne urządzeń do rafinacji ciekłego aluminium. Historia budowy tego typu instalacji sięga roku 2008, kiedy to przystąpiono do zaprojektowania i budowy stanowiska badawczego procesu barbotażu aluminium. Elementy tego stanowiska przedstawiono na rys. 2.11. Stanowisko badawcze wykonano tak, by montaż poszczególnych elementów nie sprawiał trudności i obsługa urządzenia była bezproblemowa.



Rys. 2.11. Widok elementów stanowiska badawczego do modelowania barbotażu aluminium

Konstrukcja zbiornika wykonana była z profili stalowych. Jego ściany wykonane z przezroczystego PMMA, pozwalały na obserwację procesów zachodzących wewnątrz. Mechanizm napędowy składał się z silnika (wiertarki) przymocowanego do podstawy. W dolnej części napędu znajdował się wałek z gwintowaną końcówką, dzięki czemu w łatwy sposób można było zamontować rotor, a także wymienić go na lancę. Regulacja obrotów silnika, a co za tym idzie obrotów wirnika rotora odbywała się w sposób płynny przez ustawienie na autotransformatorze wcześniej obliczonych prędkości wirnika wykonanych przy pomocy lampy stroboskopowej. Doświadczenia uzyskane w trakcie budowy i przeprowadzonych doświadczeń na tym stanowisku pozwoliły na konstrukcję i wykonanie jego znacznie ulepszonej wersji, która obecnie znajduje się w Laboratorium Badań Modelowych. Opis tego stanowiska i wybrane wyniki badań przedstawiono w dalszej części tego rozdziału monografii.

## 2.2. Badania modelowe procesów zachodzących w metalurgicznym piecu szybowym

W latach 1996-1998, realizując projekt badawczy o numerze 7 T08B 015 11 (PB 784/TO8/96/11) pt.: „Ocena przepływu przez złoża kawałkowe gazu obciążonego pyłem”, w ówczesnej Katedrze Metalurgii Politechniki Śląskiej, podjęto badania modelowe układu gaz niosący pył – złoża kawałkowe. Eksperymenty prowadzono z uwzględnieniem liczb kryterialnych Reynoldsa i Froude’a, postulując podobieństwo dynamiczne przepływów w obiekcie rzeczywistym (szyb redukcyjny instalacji Corex oraz szyb wielkiego pieca) i w obiekcie modelowym.

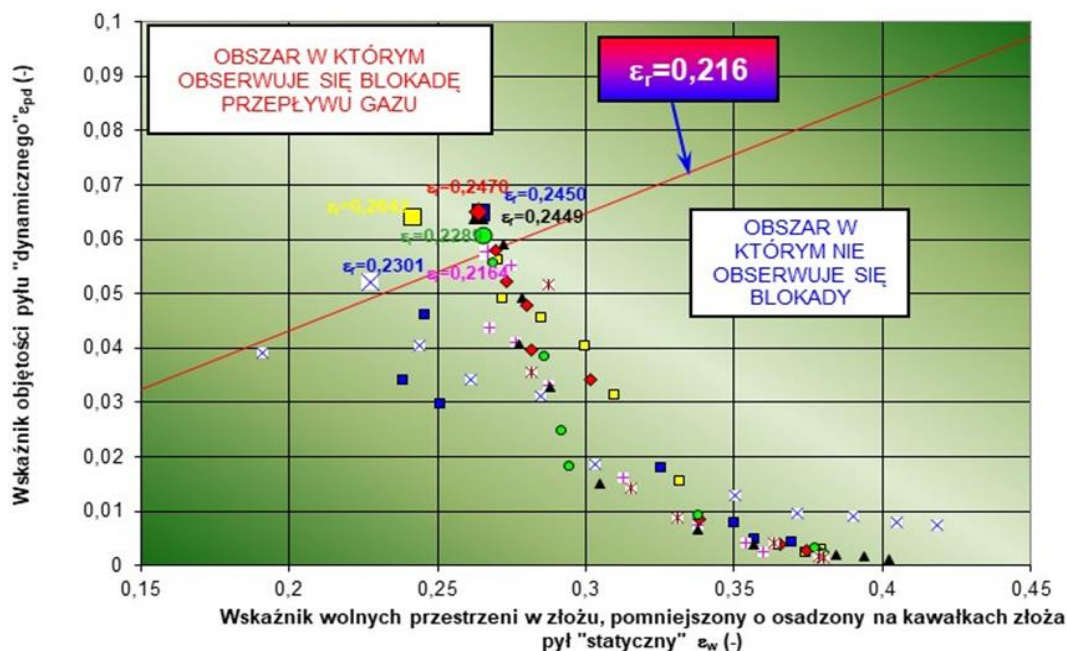
W pierwszym etapie badania prowadzono przy nieruchomym złożu kawałkowym (fotografię instalacji badawczej zamieszczono na rys. 2.1). Celem pracy było:

- zbadanie wpływu prędkości gazu, ilości pyłu w gazie, parametrów geometrycznych kolumny, złoża i pyłu na opory przepływu gazu i ilości pyłu zatrzymanego w złożu kawałkowym przy przepływie dwufazowym (gaz + pył);
- opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na wyliczenie ilości pyłu zatrzymanego w złożu kawałkowym, oporów przepływu gazu niosącego pył i warunków blokady przepływu, uwzględniającego wpływ ilości pyłu w gazie, wielkości cząstek pyłu i wielkości kawałków złoża.

Stwierdzono, że podczas przepływu dwufazowego gazu obciążonego pyłem przez złoża kawałkowe, pył niesiony przez gaz w części osadza się na kawałkach złoża (pył „statyczny”), w części przemieszcza się (pył „dynamiczny”) w przestrzeniach międzykawałkowych pomniejszych o osadzony na kawałkach złoża pył „statyczny”. Na bazie przeprowadzonych badań oporów przepływu gazu i ilości zatrzymanego w złożu pyłu opracowano jednowymiarowy model matematyczny przepływu dwufazowego (gaz + pył) przez złoża kawałkowe.

Ustalono, że do wystąpienia blokady przepływu dwufazowego (gaz + pył) przez złoża kawałkowe, dochodzi w momencie gdy udział objętościowy pyłu „dynamicznego” ( $\varepsilon_{pd}$ ), w wolnych przestrzeniach złoża pomniejszych o pył

„statyczny” ( $\varepsilon_w$ ), przekracza wartość krytyczną ( $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{pd}}{\varepsilon_w} > 0,216$ ), przy której pył zatrzymany w złożu wstrzymuje dalszy przepływ gazu. Graficznie zależność tą przedstawiono na rys. 2.12. Pełne wyniki tych badań zamieszczono w publikacjach [1 – 3].



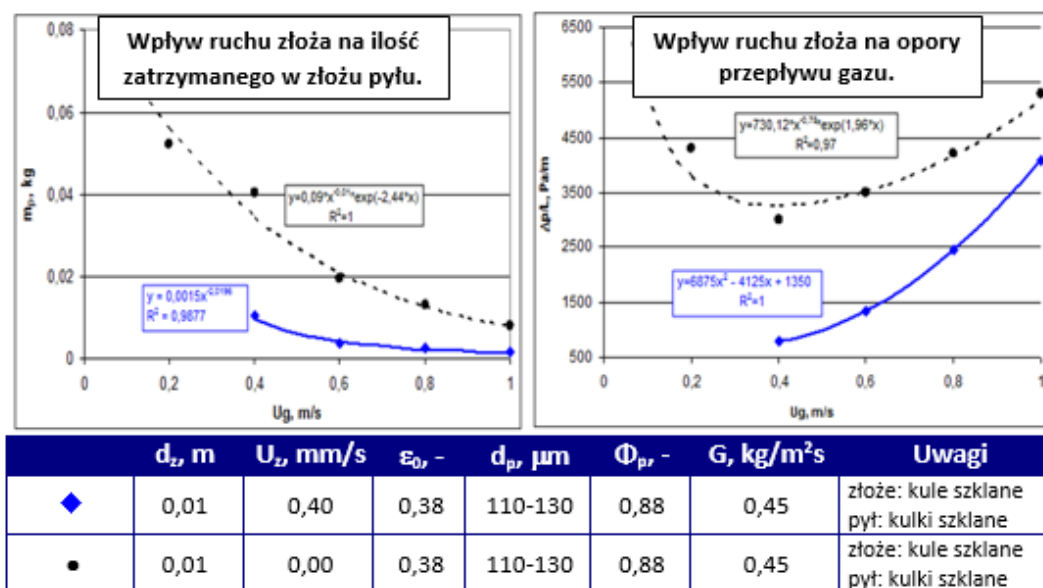
Rys. 2.12. Kryterium określające moment zajścia blokady przepływu dwufazowego (gaz + pył) przez złożo kawałkowe

W drugim etapie, w latach 2003 – 2006, zainicjowano badania dwufazowego przepływu (gaz-pył) przez schodzące złożo kawałkowe. Badania te realizowano w ramach projektu badawczego KBN nr 4 TO8B 026 25 (PBU 58/RM1/2003), pt.: "Modelowanie fizyczne i matematyczne zjawisk zachodzących przy dwufazowym (gaz + pył) przepływie przez ruchome złożo kawałkowe w piecach szybowych".

Celem badań było:

- dokonanie oceny wpływu prędkości gazu, ilości, rodzaju i wielkości cząstek pyłu w gazie, oraz rodzaju i wielkości kawałków złoża na opory przepływu i ilości pyłu zatrzymanego w złożu kawałkowym;
- opracowanie modelu matematycznego przepływu dwufazowego (gaz + pył) przez złożo ruchome, uwzględniającego wpływ ilości pyłu w gazie, wielkości cząstek pyłu i wielkości kawałków złoża, pozwalającego na wyliczenie ilości pyłu zatrzymanego w złożu kawałkowym i oporów przepływu gazu niosącego pył.

W wyniku przeprowadzonych badań z wykorzystaniem modelu fizycznego (rys. 2.2) m.in. stwierdzono, że ruchome złożo zmienia w istotny sposób warunki przepływu gazu. Konsekwencją uruchomienia złoża jest częściowe usuwanie pyłu ze złoża. Cząstki w ruchu rozluźniają swój kontakt. To powoduje mniejszą ilość pyłu zatrzymanego w złożu i w konsekwencji mniejsze opory przepływu gazu, co graficznie przedstawiono za pomocą wykresów na rys. 2.13.



gdzie:  $d_p$  - średnica cząstek pyłu,  $d_z$  - średnica kawałków złoża,  $G$ , - pozorna prędkość masowa strumienia pyłu (odniesiona do wolnego przekroju kolumny),  $L$  - odcinek długości (wysokości) złoża kawałkowego,  $m_p$  - masa pyłu,  $U_z$  - prędkość cząstek złoża,  $\Delta p$  - różnica ciśnień,  $\varepsilon_0$  - wskaźnik objętości początkowych wolnych przestrzeni w złożu,  $\Phi_p$  - współczynnik kształtu cząstek pyłu

Rys. 2.13. Wpływ ruchu złoża na ilość zatrzymanego w złożu pyłu i opory przepływu gazu

W dalszej części tych badań określono wpływ: prędkości gazu, ilości pyłu w gazie, wielkości cząstek pyłu, wielkości kawałków złoża, rodzaju cząstek pyłu, rodzaju kawałków złoża – na opory przepływu i ilości pyłu zatrzymanego w złożu. Kompletnie wyniki tych doświadczeń opublikowano w pracach [4 – 12].

W trzecim etapie, w roku 2009, uruchomiono badania modelowe przepływu dwufazowego (gaz + pył) przez ruchome złożo kawałkowe, uwzględniające radialny rozkład wsadu i ciśnienia gazu (instalację badawczą przedstawia rys. 2.3). Początkowo eksperymenty realizowano w ramach projektu badawczego KBN nr N N508 400037 (PBU 96/RM1/2009). Celem badań było:

- dokonanie oceny wpływu prędkości gazu, rodzaju, wielkości i ilości cząstek pyłu w gazie, oraz rodzaju i wielkości kawałków złoża na opory przepływu gazu, w funkcji wysokości kolumny pomiarowej;
- dokonanie oceny wpływu prędkości gazu, rodzaju, wielkości i ilości cząstek pyłu w gazie, oraz rodzaju i wielkości kawałków złoża na ilości zatrzymanego w złożu pyłu „statycznego” i „dynamicznego” oraz całkowitą ilość pyłu zatrzymanego w złożu, w funkcji wysokości kolumny pomiarowej;
- dokonanie oceny wpływu prędkości gazu, rodzaju i wielkości kawałków złoża na rozkład ciśnienia statycznego w funkcji promienia kolumny pomiarowej.

Następnie na podstawie otrzymanych wyników badań laboratoryjnych:

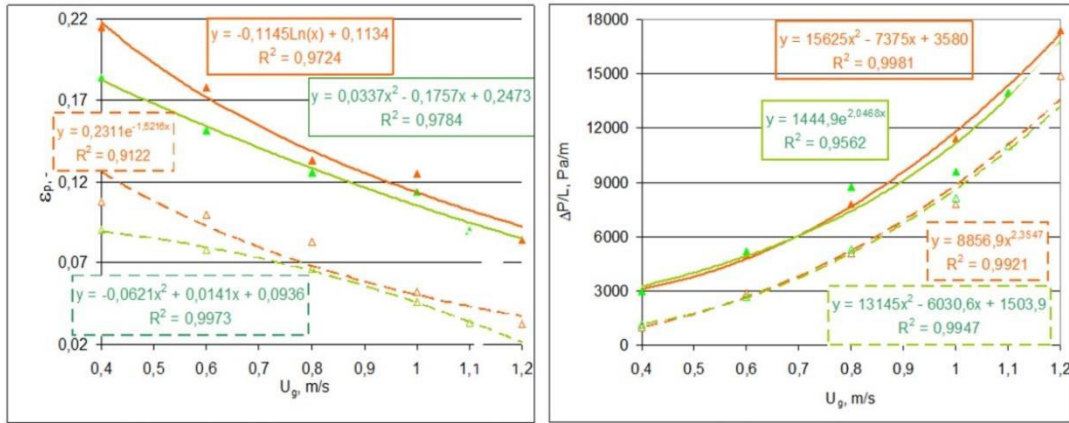
- opracowano dwuwymiarowy model matematyczny przepływu dwufazowego (gaz + pył) przez złożę ruchome, uwzględniający wpływ ilości pyłu w gazie, rodzaju i wielkości cząstek pyłu oraz rodzaju i wielkości kawałków złoża;
- określono warunki, w których dochodzi do zawieszania schodzącego złoża;
- obliczono opory przepływu spowodowane przez siły oddziaływania gazowej fazy przepływu w funkcji promienia kolumny pomiarowej;
- obliczono rozkład zatrzymanego w kolumnie badawczej pyłu w funkcji promienia kolumny;
- zweryfikowano model w oparciu o uzyskane na modelu fizycznym wyniki badań.

Jako złożę kawałkowe stosowano: kule szklane (0,010 m i 0,016 m), kule ceramiczne na bazie  $Al_2O_3$  (0,013 m), grudki wielkopieczowe (0,016 m), spiek wielkopieczowy (0,014 m), a jako pył: kulki szklane (0,110 mm do 0,130 mm, 0,090 mm do 0,110 mm), pył żelaza (0,090 mm do 0,130 mm) i pył węgla (0,100 mm do 0,140 mm).

Podczas przeprowadzonych badań stwierdzono m.in. że dolny odcinek złoża (od 0 do 100 mm) to obszar wzmożonego zatrzymywania pyłu „statycznego”. Całkowita masa pyłu zatrzymanego w złożu rośnie ze wzrostem wskaźnika objętości początkowych wolnych przestrzeni w złożu  $\epsilon_0$ . Wzrost  $\epsilon_0$  przesuwają też prędkość maksymalną w zakres wyższych wartości. Konsekwencją większej masy zatrzymywanego u dołu złoża pyłu jest wzrost oporów przepływu gazu, które rosną ze wzrostem prędkości pozornej gazu. Graficznie ukazują to wykresy zamieszczone na rys. 2.14. We wszystkich analizowanych złożach stwierdzono zróżnicowanie radialnego rozkładu ciśnienia na poziomie dysz. W przypadku złoża drobniejszego (0,010 m) w pobliżu wlotu gazu (przy ścianie) ciśnienie jest najwyższe, a gdy złożę składa się z kul lub grudek o średnicy 0,016 m ciśnienie przy ścianie jest niższe niż w środku złoża.

W każdym przypadku zróżnicowanie ciśnienia względem promienia maleje ze wzrostem poziomu wysokości złoża. Przy prędkości minimalnej ciśnienie w wyższych partiach złoża przyjmuje wartość stałą lub bliską stałej, co przedstawiono za pomocą wykresów na rys. 2.15.

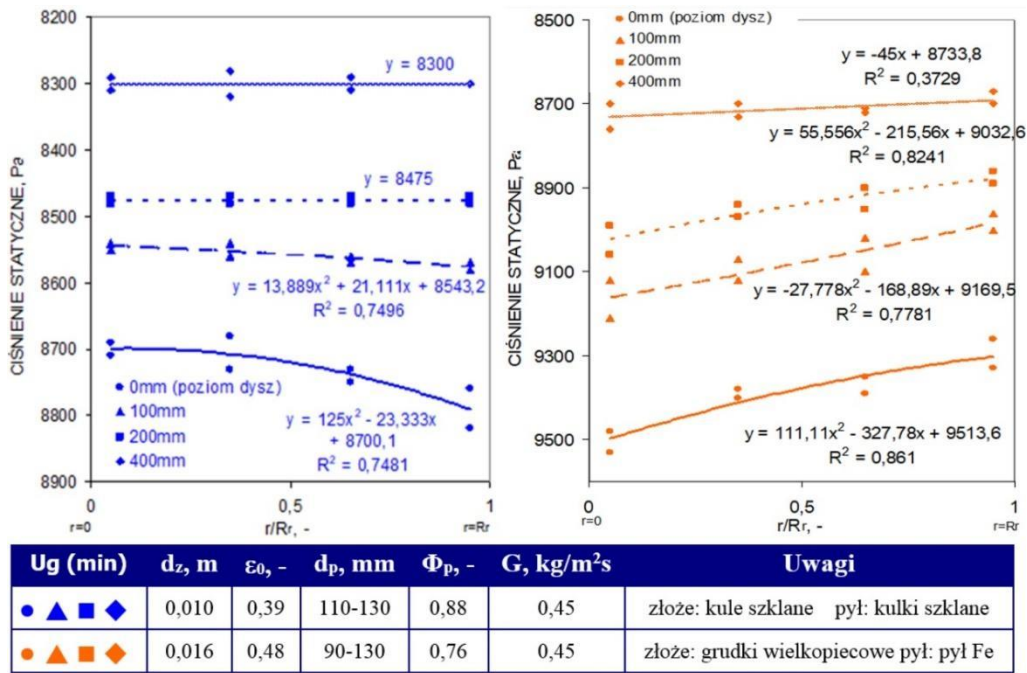




$\epsilon_p$  - wskaźnik objętości całkowitej masy pyłu zatrzymanego w złożu kawałkowym

$L_{(0-100\text{ mm})}$	$L_{(100-400\text{ mm})}$	$d_z, \text{ m}$	$\epsilon_0, -$	$d_p, \text{ mm}$	$\Phi_p, -$	$G, \text{ kg/m}^2\text{s}$	Uwagi
▲	△	0,013	0,45	0,090-0,130	0,76	0,45	złoże: kule $\text{Al}_2\text{O}_3$ pył: pył Fe
■	□	0,016	0,48	0,090-0,130	0,76	0,45	złoże: grudki wielkopieczowe pył: pył Fe

Rys. 2.14. Wpływ rodzaju i wielkości kawałków złoża na całkowitą masę zatrzymanego w złożu pyłu i opory przepływu gazu w funkcji prędkości gazu

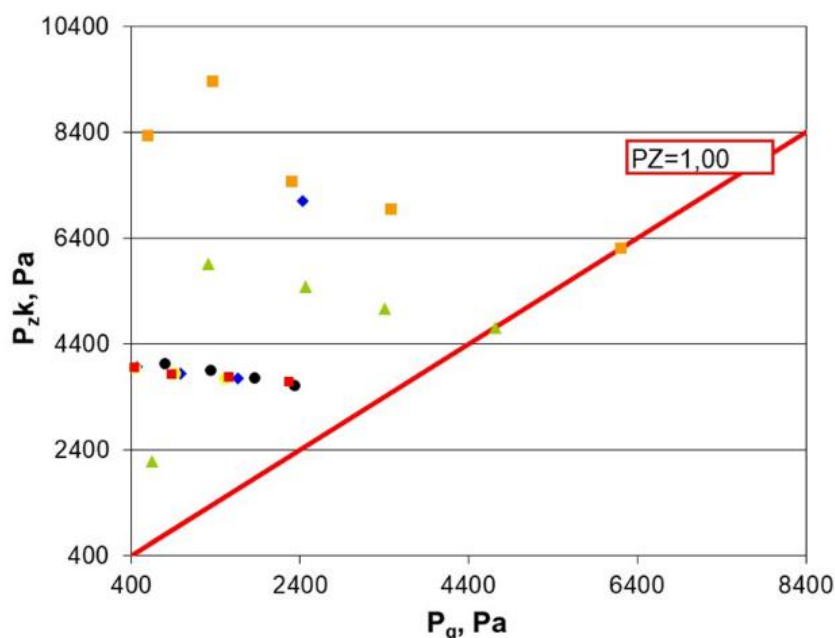


$U_g \text{ (min)}$	$d_z, \text{ m}$	$\epsilon_0, -$	$d_p, \text{ mm}$	$\Phi_p, -$	$G, \text{ kg/m}^2\text{s}$	Uwagi
● ▲ ■ ◆	0,010	0,39	110-130	0,88	0,45	złoże: kule szklane pył: kulki szklane
● ▲ ■ ◆	0,016	0,48	90-130	0,76	0,45	złoże: grudki wielkopieczowe pył: pył Fe

Rys. 2.15. Wartości radialnego rozkładu ciśnienia statycznego ( $U_g=0,4 \text{ m/s}$ )

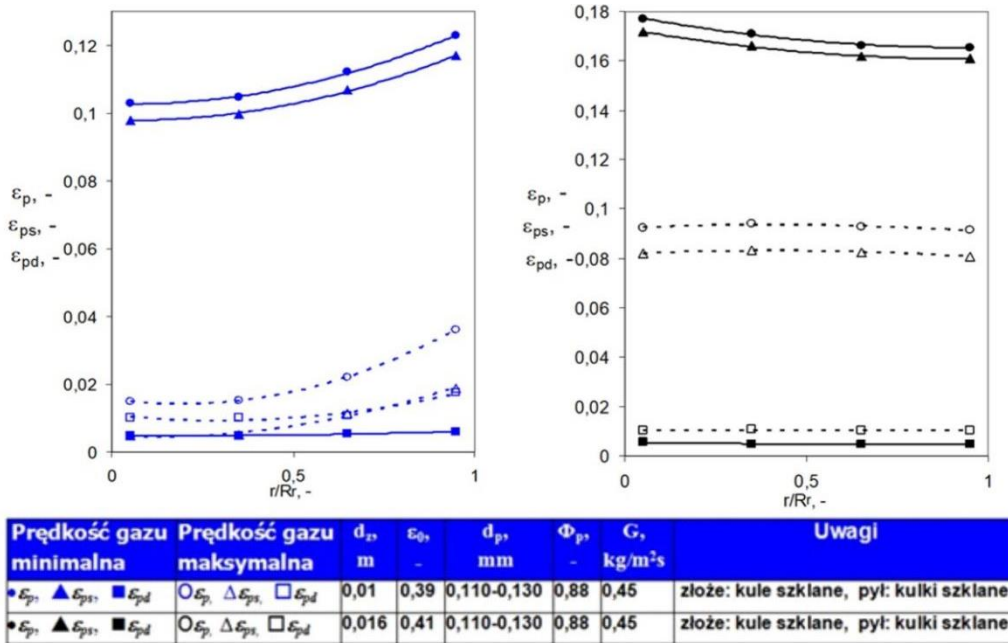
Dla układów złoża z kul wysokoglinowych-pył Fe, i złoża z grudek wielkopieczowych-pył Fe, przy maksymalnych, stosowanych w badaniach, prędkościach gazu doszło do zawieszania złoża. Warunki, w których dochodzi do zawieszania złoża określono wprowadzając parametr zawieszania PZ. Jest to stosunek skorygowanego ciśnienia słupa materiału złoża i osadzonego w nim pyłu „statycznego” na poprzeczny przekrój złoża (kolumny) w miejscu wdmuchiwania gazu

z pyłem – ( $P_{zk}$ ) do ciśnienia fazy gazowej w tym miejscu  $P_g$ . Współczynnik  $k$  koryguje niezakłócony ruch grawitacyjny cząstek złoża w związku z oddziaływaniami międzycząsteczkowymi w złożu. Do zjawiska zawieszania dochodzi, gdy parametr zwieszania  $PZ$  osiągnie wartość poniżej jedności, co graficznie prezentuje rys. 2.16.



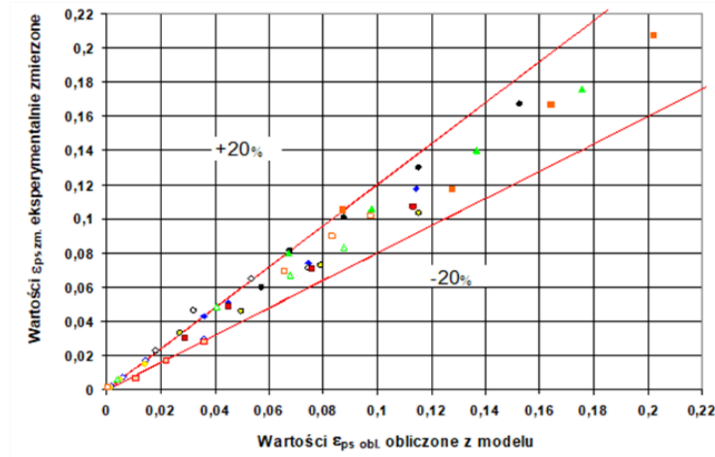
Rys. 2.16. Parametr określający moment zawieszania złoża podczas dwufazowego (gaz+pył) przepływu przez ruchome złożo kawałkowe

Na podstawie otrzymanych wyników i poczynionych obserwacji podczas badań laboratoryjnych, opracowano model matematyczny opisujący badane zjawiska. Korzystając z eksperymentalnie otrzymanych wartości radialnego rozkładu ciśnienia statycznego na 4 poziomach wysokości złoża, przy użyciu modelu matematycznego, obliczono radialny rozkład wartości wskaźników  $\epsilon_{ps}$ ,  $\epsilon_{pd}$ ,  $\epsilon_p$ . Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 2.17. Można zauważyć, że frakcja pyłu „statycznego” dominuje w udziale wartości wskaźnika  $\epsilon_p$  i decyduje o jego rozkładzie. W przypadku złoża drobniejszego maksymalne ilości pyłu „statycznego” koncentrują się przy ścianach. Gdy złożo składa się z kul o średnicy 0,016 m lub grudek wielkopiecowych koncentracja pyłu „statycznego” przy ścianie jest mniejsza niż w środku złoża.



Rys. 2.17. Radialny rozkład wskaźników ( $\epsilon_p$ ), ( $\epsilon_{ps}$ ), ( $\epsilon_{pd}$ ), (poziom: 0-100 mm)

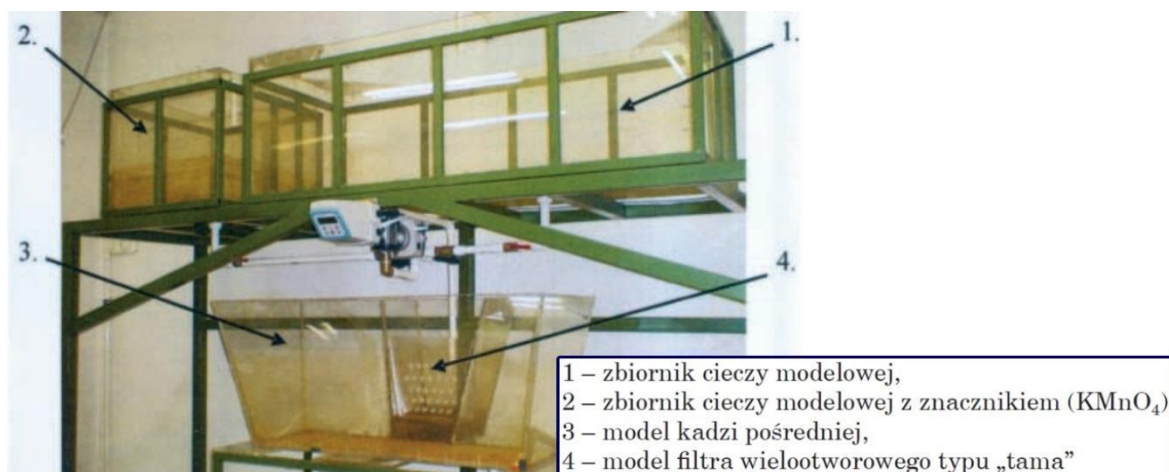
W celu porównania wartości obliczonych ze zmierzonymi, wszystkie obliczone i zmierzone wartości oporów przepływu i wskaźników objętości pyłu „statycznego”, objętości pyłu „dynamicznego” oraz objętości całkowitej masy pyłu naniesiono jako punkty na wykresy. Przykładowe wyniki tych badań przedstawiono na rys. 2.18, zaś wyniki całościowe opisano w pracach [13 – 20].



Rys. 2.18. Porównanie zmierzonych eksperymentalnie wartości wskaźnika objętości pyłu „statycznego”

### 2.3. Badania modelowe obróbki pozapiecowej i ciągłego odlewania stali

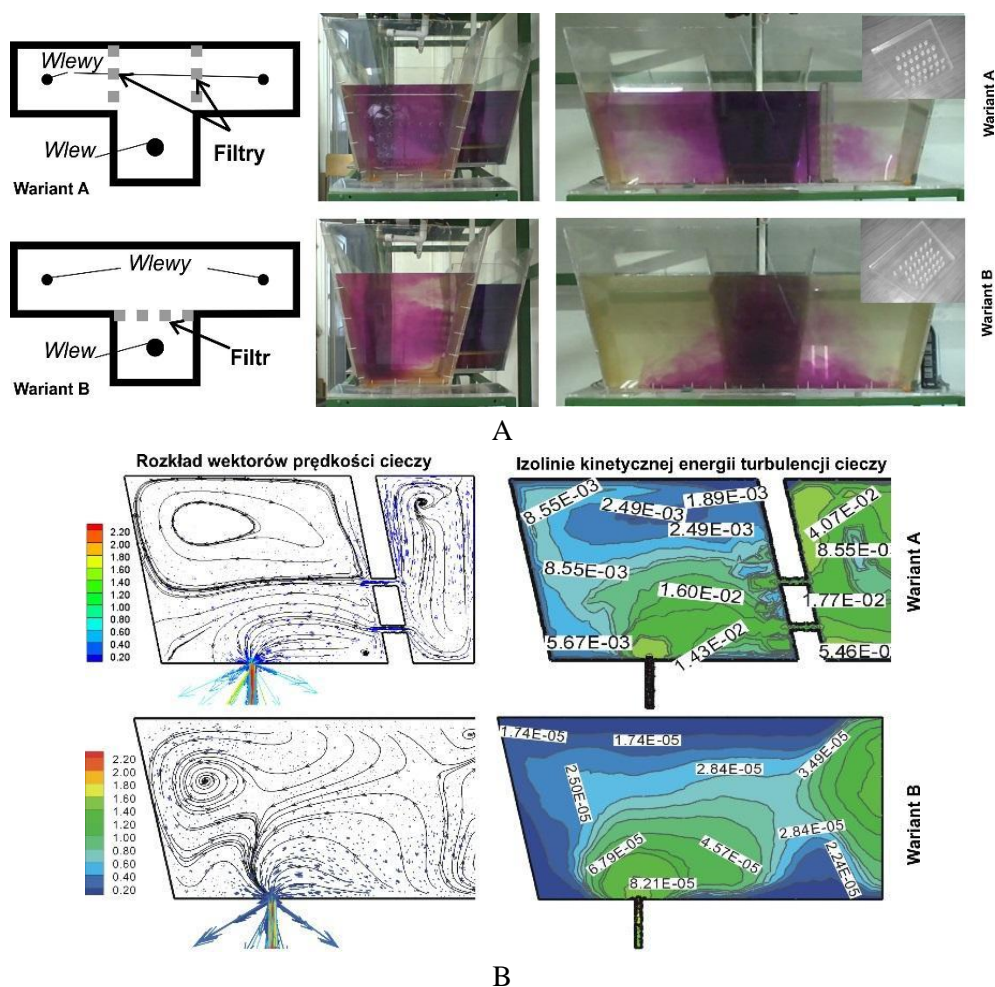
W latach 2007-2010 w ramach projektu rozwojowego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr R07 019 03 pt. „Nowa technologia rafinacji ciekłego metalu za pomocą filtrów ceramicznych” w Laboratorium Badań Modelowych realizowano badania fizyczne na modelu kadzi pośredniej urządzenia COS (rys. 2.19).



Rys. 2.19. Widok hydraulicznego modelu fizycznego urządzenia COS.

Projekt obejmował szereg badań podstawowych oraz technologicznych, zarówno laboratoryjnych, jak i przemysłowych. Koncepcja badań procesu filtracji ciekłej stali opierała się na przeprowadzeniu prób laboratoryjnych w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach, w warunkach odlewania stali z próżniowego pieca indukcyjnego oraz prób przemysłowych w warunkach produkcyjnych (Gonar – Stalownia Baildon Sp. z o.o. oraz Magnesy Baildon Sp. z o.o. – Wydział Mikrostalowni). Próby przemysłowe filtrowania w warunkach COS, były poprzedzone badaniami modelowymi fizycznymi oraz symulującymi przepływ ciekłej stali w kadzi pośredniej po zamontowaniu w jej przestrzeni roboczej filtrów. W ich wyniku określano stan pracy stosowanych kadzi oraz optymalnej lokalizacji filtrów ceramicznych w przestrzeni roboczej kadzi, wraz z ustaleniem ilości filtrów w przegrodzie i wielkości oczek (kanalików filtracyjnych). Przy wyborze materiału na filtry brano pod uwagę przede wszystkim ekstremalne warunki pracy filtrów, w tym: temperaturę odlewanej stali, obciążenia mechaniczne i występujący każdorazowo w czasie odlewania szok termiczny.

Przykładowe wyniki wizualizacji przeprowadzone z zastosowaniem fizycznego modelu oraz wyniki symulacji CFD ilustruje rys. 2.20.



Rys. 2.20. Wyniki badań wizualizacji przepływu A) w modelu kadzi pośredniej, B) wyniki CFD

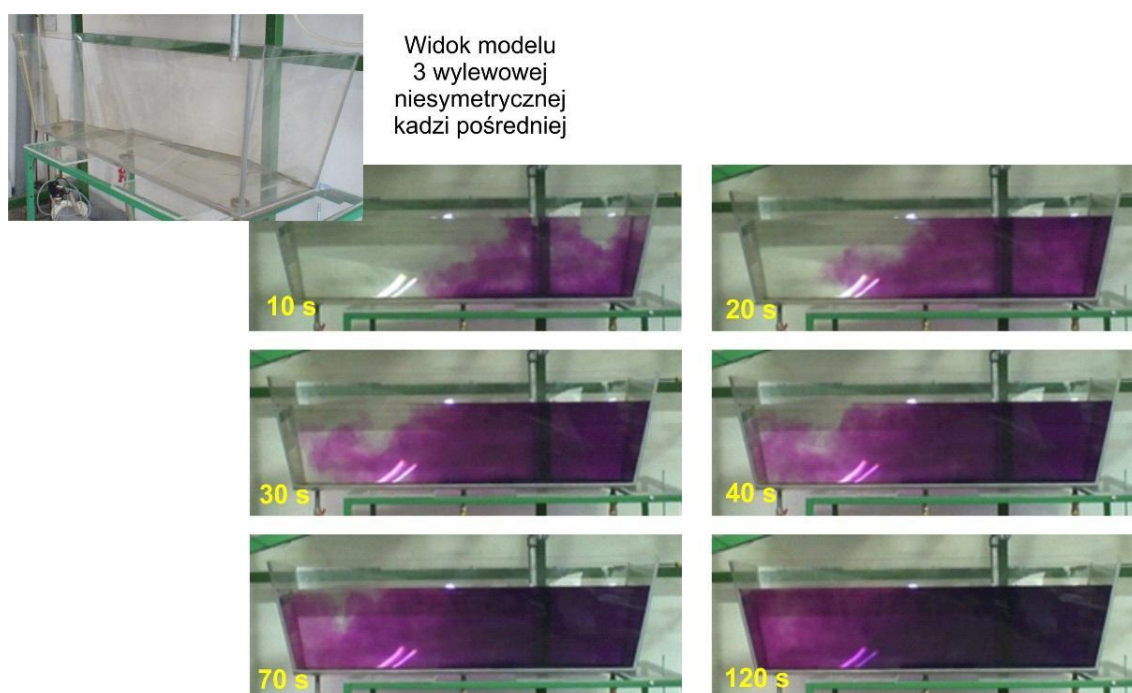
Dokonana ocena jakościowa stali poddanej procesowi filtracji w kadzi pośredniej urządzenia COS wykazała, że w wyniku filtracji nastąpiła poprawa czystości metalurgicznej stali, wyrażona zmniejszeniem udziału powierzchniowego wtrąceń niemetalicznych oraz ich ilości, jak również zmniejszeniem zawartości tlenu całkowitego w stali. Wyniki opisywanej tematyki zawarto w pracach [21 – 23].

W latach 2009-2011 realizowano projekt rozwojowy N R07 0021 06 pt. „Zastosowanie symulacji fizycznej i numerycznej do opracowania technologii ciągłego odlewania wlewków stalowych o przekroju kołowym na urządzeniu o małym promieniu łuku”. Koordynatorem i głównym wykonawcą był Instytut Metalurgii Żelaza, projekt realizowany był przy współpracy Politechniki Śląskiej ze spółkami: Gonar Stalownia Baildon oraz Ferrostal Łabędy.

Celem projektu było opracowanie technologii odlewania ciągłego wlewków w zakresie wymiarowym  $\varnothing 170 - 200$  mm na urządzeniach o małym promieniu łuku, ze szczególnym uwzględnieniem naprężeń powstających podczas prostowania żyły.

W projekcie zastosowano symulację fizyczną procesu ciągłego odlewania stali z użyciem symulatora Gleeble 3800 do wyznaczenia wysokotemperaturowych charakterystyk (m.in. temperatur zerowej wytrzymałości i zerowej plastyczności). Symulacje te uzupełniono modelowaniem fizycznym i numerycznym na Politechnice Śląskiej. Do określenia charakterystyki przepływu i mieszania w kadzi pośredniej i krystalizatorze zbudowano dwa modele kadzi pośredniej i cztery modele krystalizatorów okrągłych.

Przykładowe wyniki tych badań przedstawiono na rys. 2.21-2.24, zaś wyniki całościowe opisano w pracach [24-27].

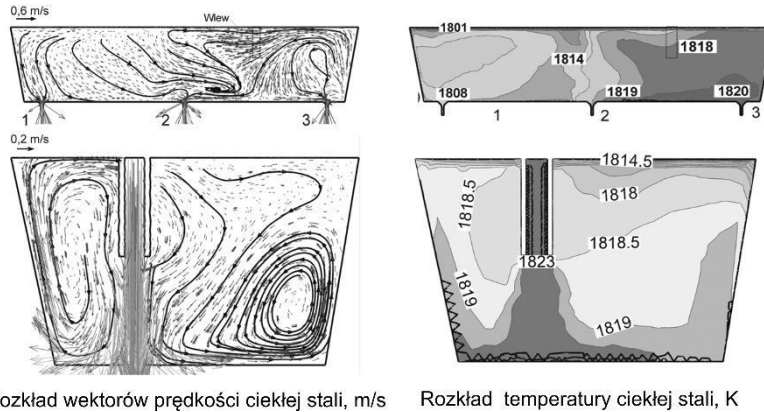


Rys. 2.21. Przykładowe rezultaty badań modelowych o charakterze wizualizacji dla trój-wylewowej kadzi pośredniej

Wielowariantowe eksperymenty dotyczące wizualizacji sposobu przepływu i mieszania się ciekłej stali w kadzi pośredniej i krystalizatorze pozwoliły na zidentyfikowanie stref martwych i ich eliminację poprzez właściwe ukierunkowanie przepływu strumienia. Badania te przyczyniły się również do właściwego określania głębokości zanurzenia wylewów w krystalizatorze i ustalenia minimalnego poziomu stali dla analizowanych typów kadzi pośrednich. Badania symulacyjne uzupełniono obliczeniami z wykorzystaniem wzorów empirycznych, parametrów charakteryzujących prawidłową pracę krystalizatorów w zakresie oscylacji i smarowania ścian. Wyniki symulacji fizycznej i numerycznej oraz obliczeń i analiz jakościowych, posłużyły do opracowania wstępnej technologii odlewania wlewków

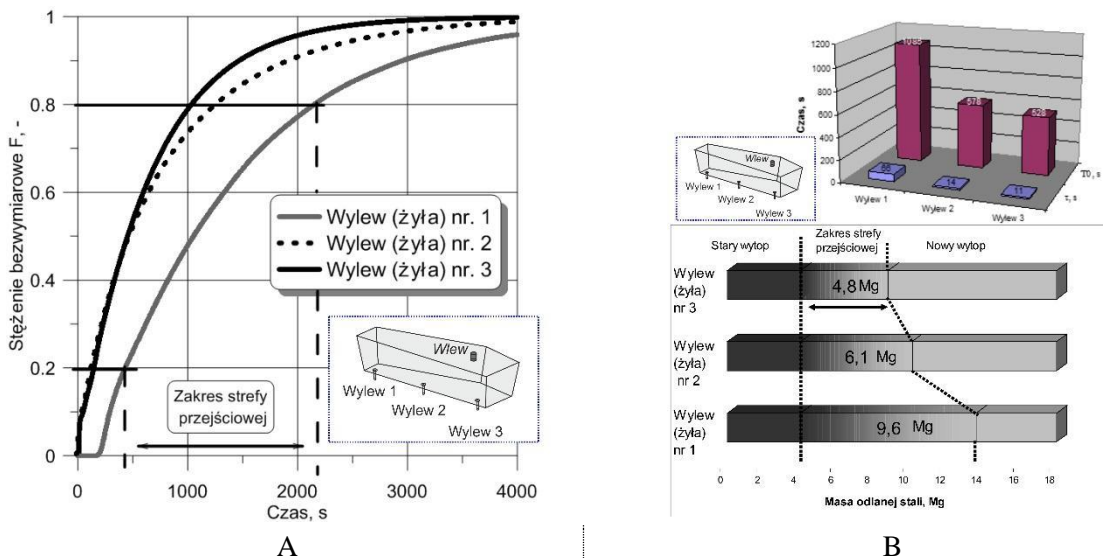
o przekroju kołowym, którą zweryfikowano na podstawie przemysłowych wytopów doświadczalnych i badań odlanych wlewków.

Na rys. 2.22 przedstawiono przykładowe rezultaty przeprowadzonych obliczeń CFD ilustrujące prognozowany ruch i temperaturę ciekłej stali w rzeczywistej kadzi pośredniej.



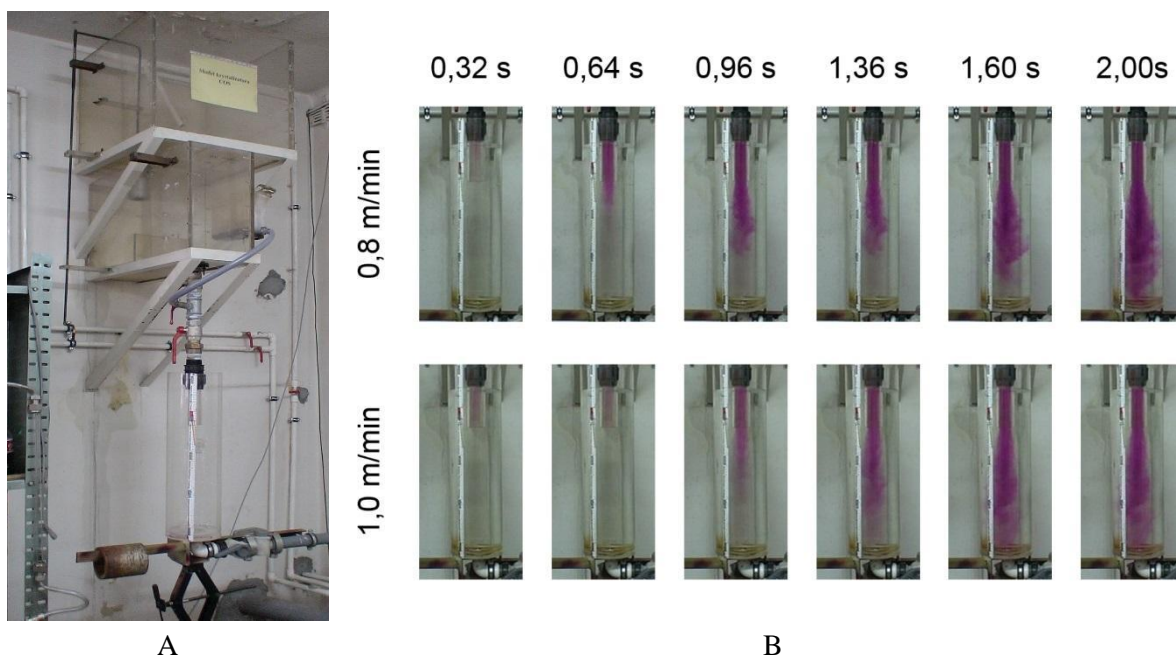
Rys. 2.22. Przykładowe rezultaty badań CFD dla trój-wylewowej kadzi pośredniej

Charakterystyki RTD dla poszczególnych wylewów niesymetrycznej kadzi pośredniej oraz zakres strefy przejściowej pokazano na rys. 2.23.



Rys. 2.23. A) Krzywe czasu przebywania stali w kadzi pośredniej typu F, B) zakres strefy przejściowej

Przykładowe rezultaty badań modelowych o charakterze wizualizacji dla modeli krystalizatorów przedstawiono na rys. 2.24.



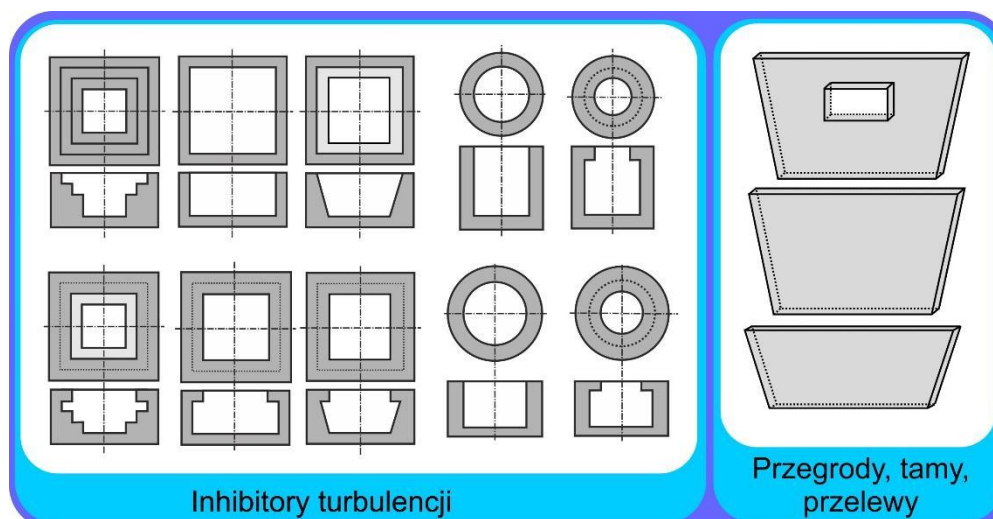
Rys. 2.24.A) Widok stanowiska do badań modelowych zjawisk zachodzących w krystalizatorze urządzenia COS, B) Przykładowe wyniki badań laboratoryjnych

Połączenie metod modelowania numerycznego i fizycznego z doświadczeniem i wiedzą praktyczną, pozwoliły na dokładną identyfikację procesów fizycznych zachodzących podczas odlewania wlewków o przekroju kołowym. Uzyskano dzięki temu możliwości właściwego zaprojektowania technologii odlewania wlewków, zidentyfikowania błędów konstrukcyjnych urządzeń COS i zastosowania nowych rozwiązań technicznych optymalizujących ich funkcjonowanie i poprawiających jakość wlewków ciągłych.

Kolejnym realizowanym projektem w latach 2009-2012 był projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N508 390337 pt. „Fizyczne i matematyczne modelowanie warunków hydrodynamicznych przepływu stali w kadzi pośredniej różniące się urządzeniami sterowania przepływem”.

Podstawowym celem tego projektu było opracowanie bazy danych obejmującej parametry techniczne i eksploatacyjne nietypowych kadzi pośrednich z różną zabudową urządzeniami sterowania przepływem (USP). W szczególności przeanalizowane zostały następstwa zabudowy wewnętrznej przestrzeni roboczej kadzi pośredniej (rys. 2.25) w celu dokonania oceny ich efektywności i potencjalnych korzyści rafinacyjnych.

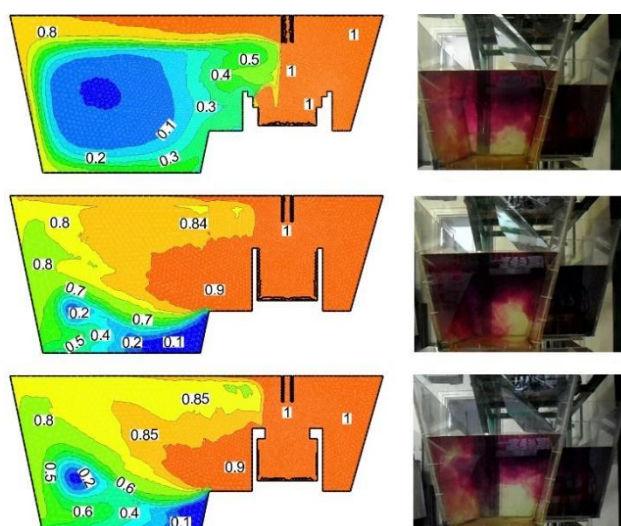




Rys. 2.25. Analizowane wyposażenie wewnętrzne przestrzeni roboczej kadzi pośrodkich

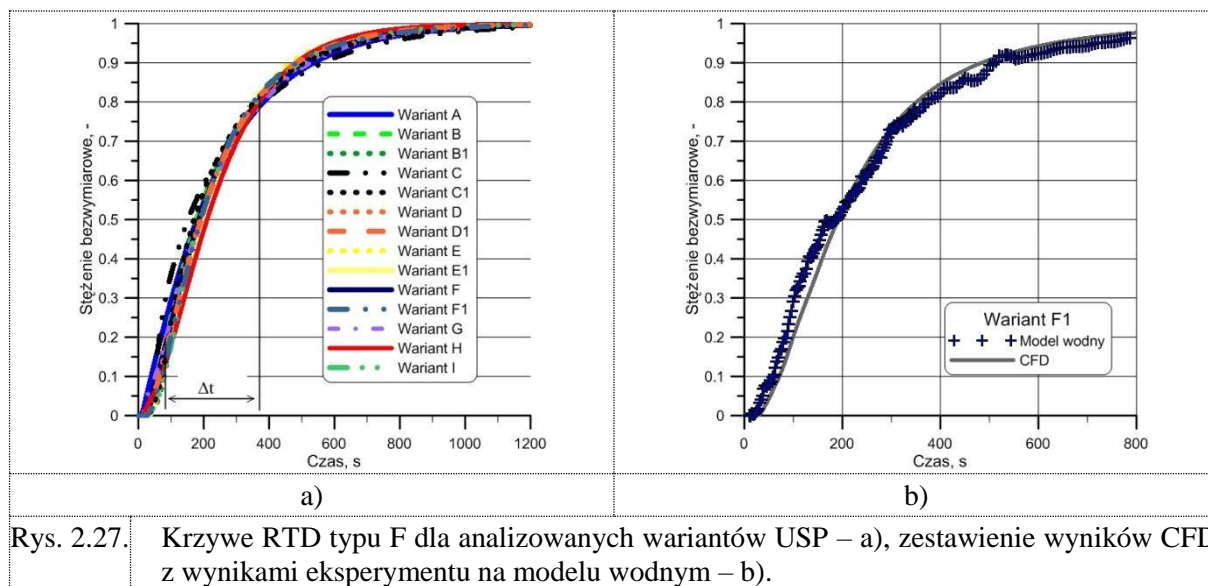
Dokonano szerokiej analizy z zastosowaniem dwóch technik badawczych modelowania fizycznego i numerycznego (tzw. modelowania hybrydowego). Numeryczne rozwiązywanie tego typu problemów polega na wyborze odpowiednich procedur, które umożliwią najbardziej efektywne i dokładne rozwiązanie modeli matematycznych za pomocą dostępnych technik cyfrowych.

Rezultaty tej działalności zostały przedstawione w czasopismach oraz na konferencjach krajowych oraz zagranicznych [27 – 36]. Na rys. 2.26 pokazano przykładowe wyniki przeprowadzonych obliczeń CFD oraz eksperymentów laboratoryjnych.

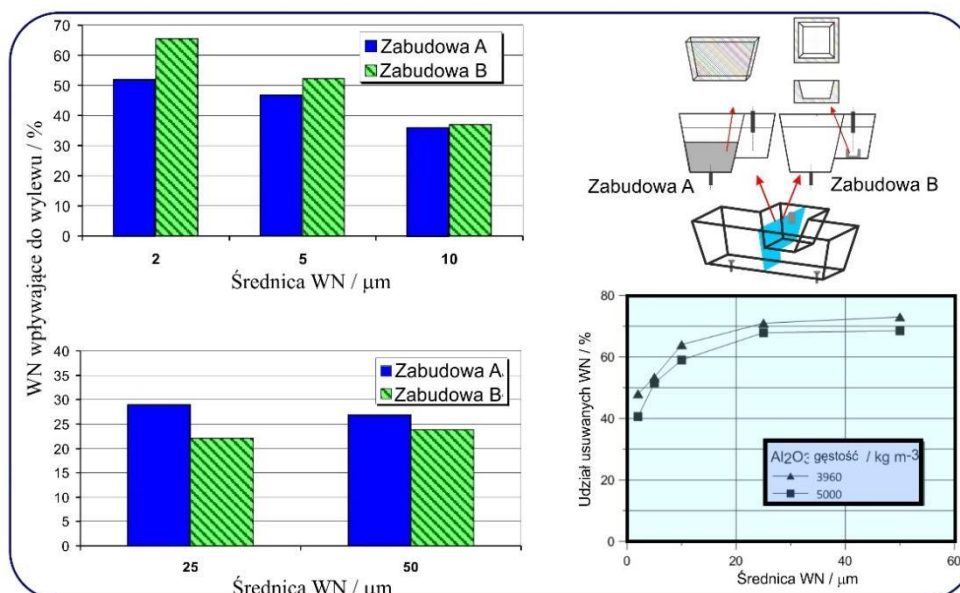


Rys. 2.26. Przykładowe wyniki przeprowadzonych obliczeń CFD oraz eksperymentów laboratoryjnych

Wybrane wyniki symulacji numerycznej dla krzywych RTD typu F analizowanych wariantów zabudowy kadzi pośredniej oraz przykładową walidację z wynikami eksperymentów laboratoryjnych pokazano na rys. 2.27.



Na rys. 2.28 przedstawiono przykładowe wyniki analizy CFD dystrybucji i separacji wtrąceń niemetalicznych (WN), dla dwóch konfiguracji zabudowy USP przestrzeni roboczej kadzi pośredniej.



Rys. 2.28. Analiza CFD dystrybucji i separacji WN w dwu-wylewowej kadzi pośredniej

Wyniki badań uzyskane w ramach w/w projektu dowiodły, iż zamontowanie zaproponowanych USP prowadzi do tworzenia się pożądanych proporcji pomiędzy

strefą intensywnego mieszania, a strefą przepływu tłokowego. Powoduje jednoczesne wydłużenie czasu przebywania kontrolnej masy stali w kadzi pośredniej (czas dotarcia do wylewów), co ma wpływ na tworzenie się korzystnych warunków jej rafinacji oraz homogenizacji. Wykazano, że typ zamontowanego USP (tama, przegroda czy inhibitor turbulencji) ma istotny wpływ na warunki hydrodynamiczne panujące w kadzi pośredniej. Dla wszystkich analizowanych wariantów zabudowy zmniejszył się udział strefy martwej, zwiększył się udział przepływu z idealnym mieszaniem. Odnotowano także wzrost udziału przepływu tłokowego, co jest zjawiskiem pożądanym z punktu widzenia oczekiwanego charakteru przepływu stali przez każdą pośrednią. Stwierdzono, iż geometria przekroju inhibitora turbulencji (kwadratowy lub okrągły) nie ma większego wpływu na kinetykę mieszania stali, oraz proporcje poszczególnych udziałów przepływu w kadzi pośredniej, w przeciwieństwie do inhibitora turbulencji o zróżnicowanym ukształtowaniu przestrzeni wewnętrznej (np. schodki, pochylenie ścian wewnętrznych czy kołnierze), które te parametry zmieniają. Najkorzystniejszym rozwiązaniem z badanych USP jest inhibitor turbulencji z kołnierzem, którego zamontowanie może sprzyjać międzyfazowemu wydzielaniu wtrąceń niemetalicznych, a tym samym poprawiać jakość otrzymywanej stali.

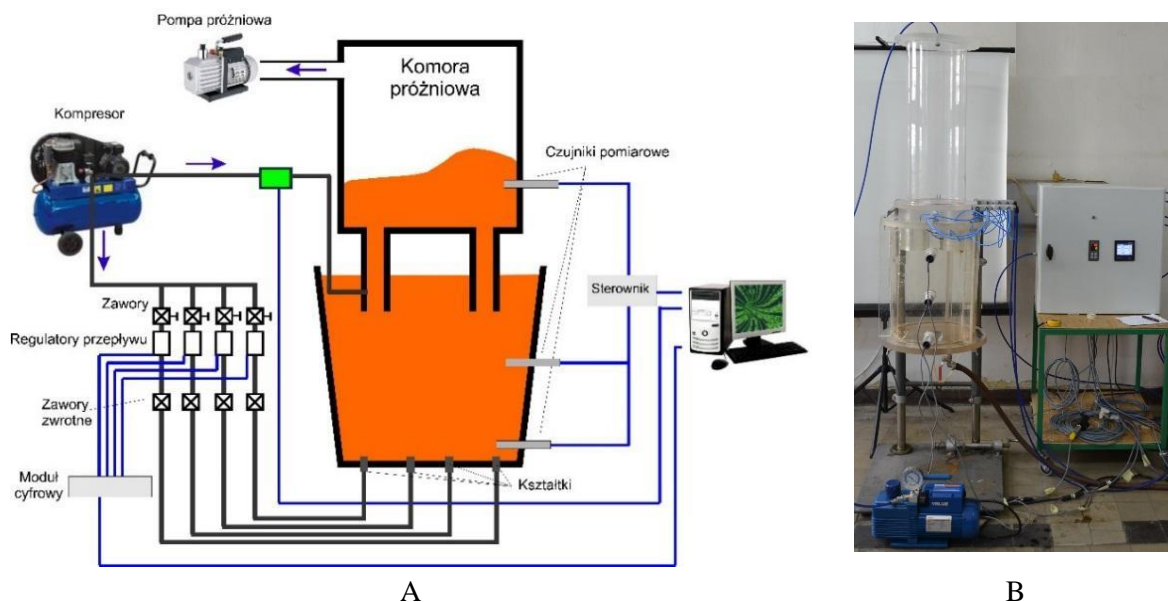
W latach 2010-2013 realizowano projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N508 589839 pt. „Modelowanie fizyczne zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w trakcie procesów przedmuchiwania gazami obojętnymi oraz obróbki próżniowej”.

Zrealizowany projekt badawczy podejmował problem optymalizacji pracy stanowisk do pozapiecowej obróbki stali: stanowiska do przedmuchiwania stali gazami obojętnymi oraz stanowiska do próżniowej obróbki stali RH, z punktu widzenia zwiększenia skuteczności ich działania.

W wyniku realizacji projektu badawczego opracowano nową w kraju technikę badawczą zjawisk hydrodynamicznych przepływów stali w procesach obróbki pozapiecowej, dotyczącej przedmuchiwania stali gazami obojętnymi w kadzi stalowniczej oraz próżniowej obróbki stali w urządzeniu RH. Technika ta oparta jest na eksperymentach przeprowadzanych na specjalnie w tym celu skonstruowanych i wykonanych zgodnie z zasadami teorii podobieństwa wodnych modelach fizycznych badanych urządzeń przemysłowych, wspomaganych jednocześnie technikami modelowania numerycznego. Zbudowane modele fizyczne umożliwiają prowadzenie badań o charakterze wizualizacji. Zainstalowana na stanowiskach laboratoryjnych aparatura pomiarowa umożliwia również wyznaczenie charakterystyk mieszania

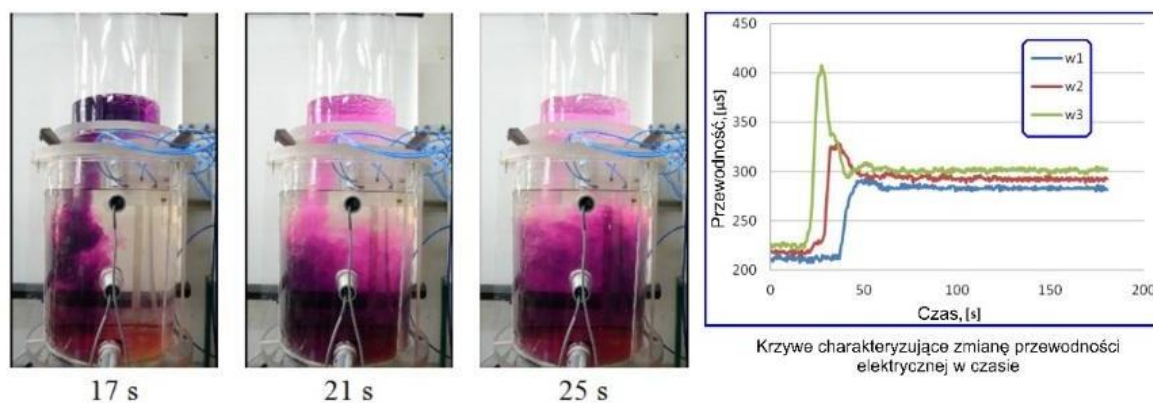
znacznika (czasu przebywania znacznika) w badanych reaktorach, jednoznacznie określających kinetykę i skuteczność badanych procesów.

Na rys. 2.29 zaprezentowano schemat zaprojektowanego i wykonanego w ramach projektu modelu urządzenia RH.



Rys. 2.29. B) Schemat instalacji i urządzeń modelu RH, B) widok modelu

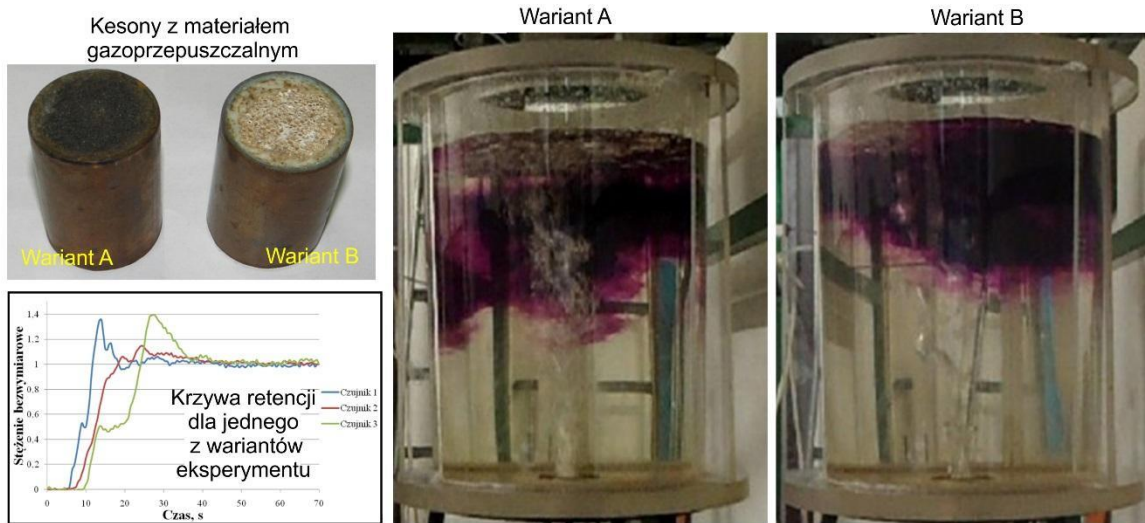
Rezultaty tej działalności zostały opublikowane w pracach [37-39]. Przykładowe wyniki wizualizacji procesu RH dla jednego z badanych wariantów przedstawiono na rys. 2.30.



Rys. 2.30. Przykładowe wyniki wizualizacji procesu RH

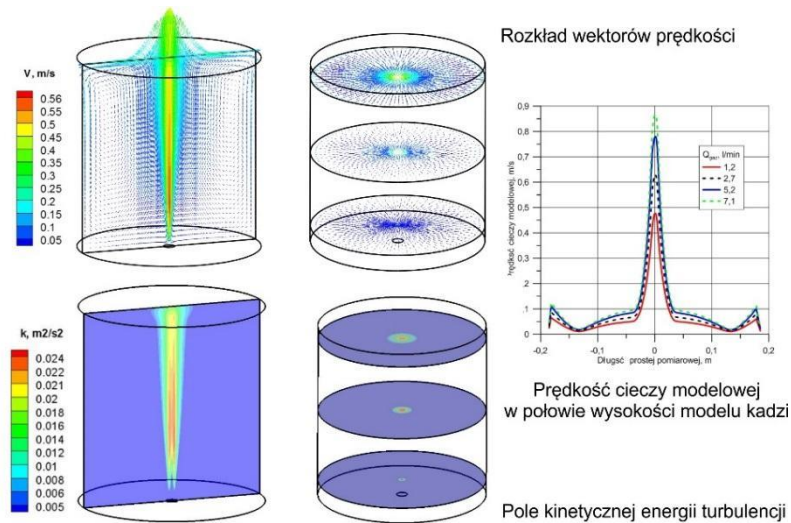
Innym zagadnieniem podczas realizacji projektu były badania, które miały na celu określenie optymalnych warunków hydrodynamicznych procesu przedmuchiwania stali gazami obojętnymi z punktu widzenia skuteczności działania kształtek

gazoprzepuszczalnych w zależności od ich porowatości oraz lokalizacji tych kształtek w dnie kadzi stalowniczej (rys. 2.31).



Rys. 2.31. Wyniki badań dla dwóch wariantów kształtek gazoprzepuszczalnych – model PK

Prezentowane wyniki analizy przeprowadzone na modelach wodnych uzupełniono o symulacje numeryczne. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 2.32.



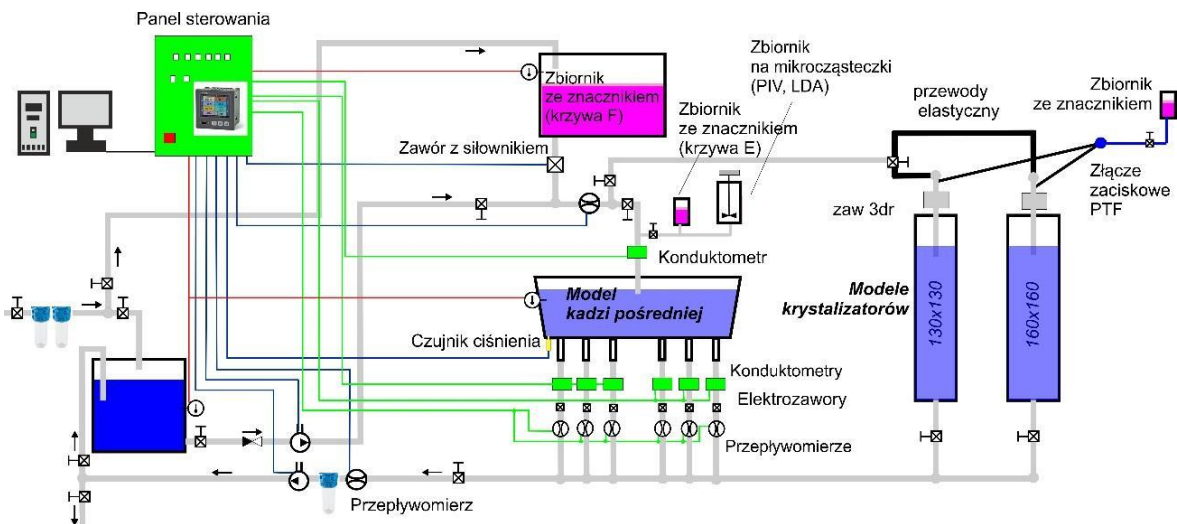
Rys. 2.32. Modelowanie numeryczne zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w trakcie procesów przedmuchiwania stali gazami obojętymi

Uzyskane rezultaty prowadzonych eksperymentów umożliwiły, zarówno optymalizację prowadzonych procesów obróbki pozapiecowej dotychczas produkowanych gatunków stali, jak i testowanie możliwości stosowania oraz dobór właściwych parametrów techniczno-technologicznych procesu obróbki pozapiecowej w przypadku wprowadzania gatunków nowych.

Kolejny realizowany projekt to „Innowacyjna i proekologiczna technologia obróbki pozapiecowej, ciągłego odlewania oraz walcowania nowych rodzajów walcówki ze stali wysokowęglowej i o zwiększonej plastyczności do odkształcania na zimno w walcowniach ciągłych z wieloetapowym chłodzeniem”, nr PBS2/A5/32/2013 finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Realizowany był w latach 2013-2016 w konsorcjum Politechnika Częstochowska - Politechnika Śląska.

W wyniku realizacji projektu zaprojektowano i wykonano dwa modele fizyczne odwzorowujące obiekty przemysłowe:

- segmentowy model urządzenia COS całkowicie zautomatyzowany (rys. 2.33 i 2.34). Jego poszczególne elementy konstrukcyjne przynależą do segmentów głównych i pomocniczych, które gwarantują spełnienie założonych cech funkcjonalności stanowiska badawczego. W modelu segmenty główne to modele kadzi pośrednich i modele krystalizatorów;
- model kadzi stalowniczej z możliwością przedmuchiwania kąpieli przez kształtkę gazoprzepuszczalną zainstalowaną w dnie modelu.



Rys. 2.33. Schemat modelu urządzenia do ciągłego odlewania stali

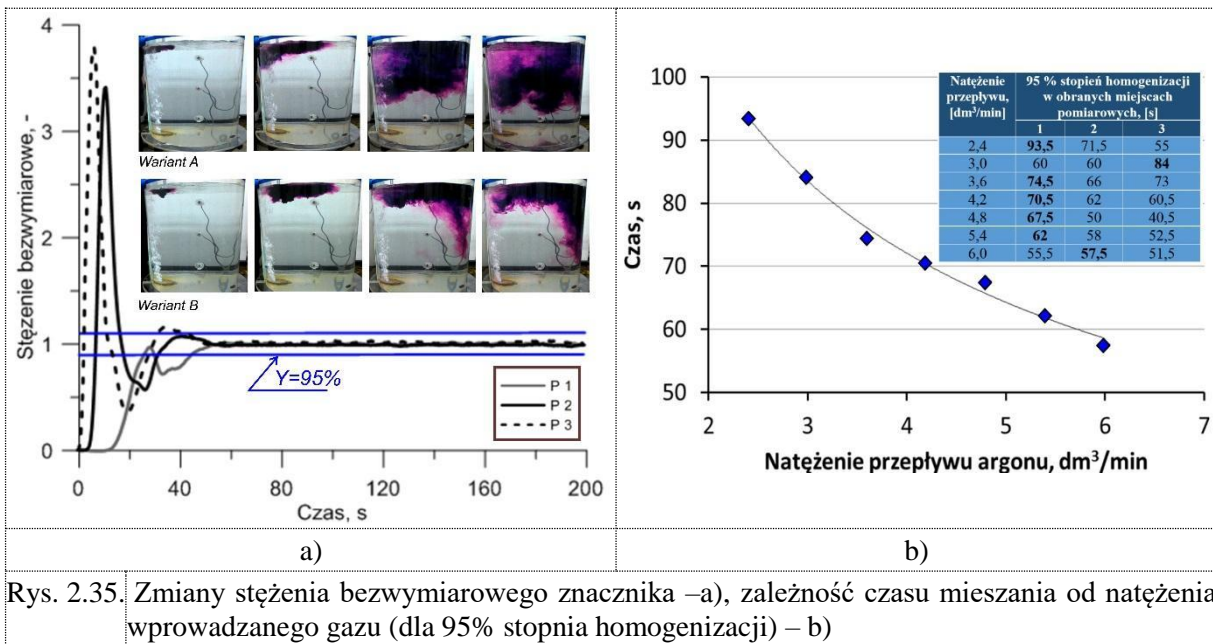
W ramach projektu na Wydziale zrealizowano dwa zadania: „Opracowanie elementów modeli matematycznych przeznaczonych do numerycznego modelowania procesów: obróbki pozapiecowej i ciągłego odlewania stali” i „Określenie hydrodynamiki przepływu i mieszania w piecu kadziowym, kadzi pośredniej i krystalizatorze na modelach fizykalnych”.



Rys. 2.34. Widok modelu urządzenia do ciągłego odlewania stali

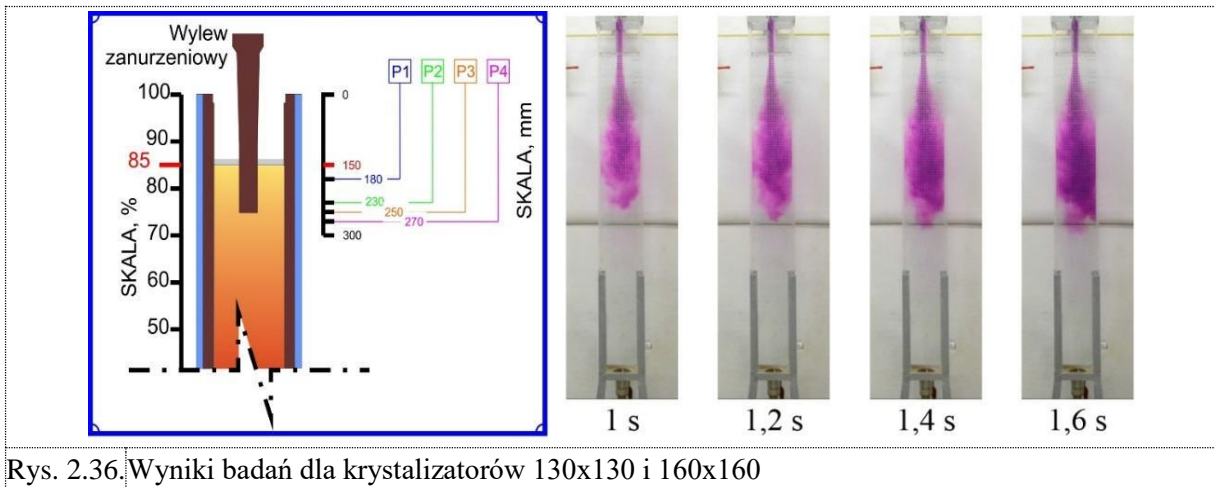
Rezultaty tej tematyki zostały przedstawione w czasopismach oraz na konferencjach krajowych oraz zagranicznych [40 – 48].

Na rys. 2.35 przedstawiano przykładowe wyniki badań fizycznych w celu analizy hydrodynamiki mieszania ciekłej stali gazami obojętymi w kadzi stalowniczej podczas obróbki pozapiecowej.



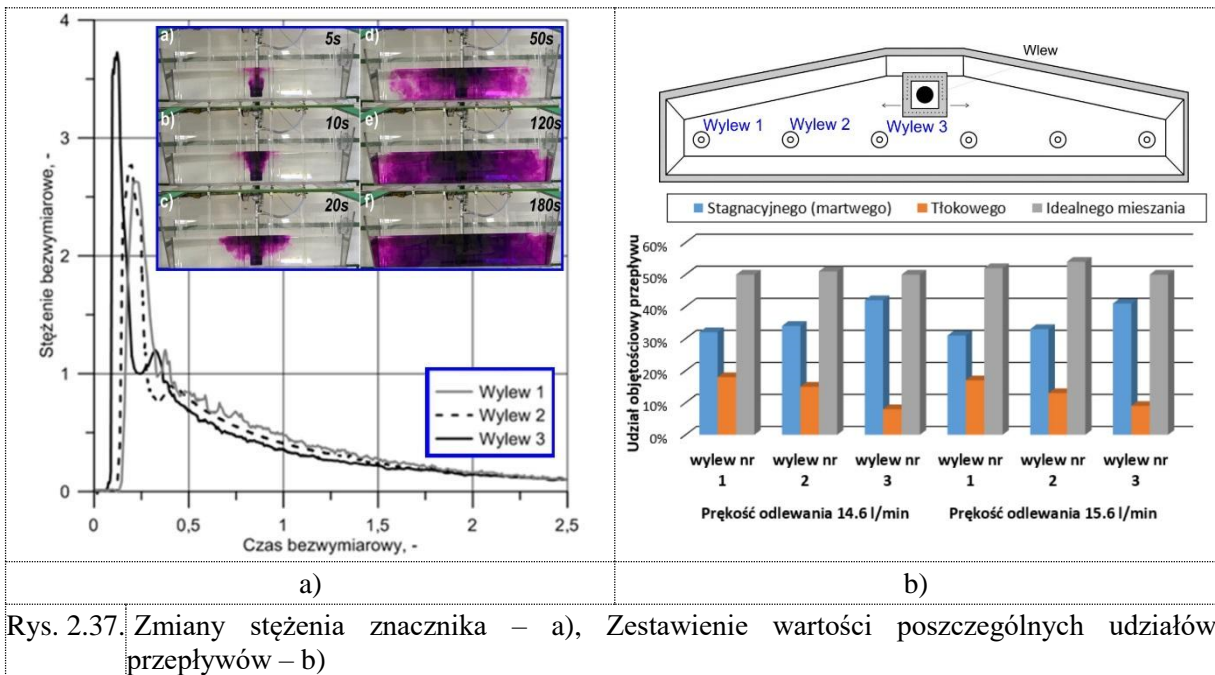
Rys. 2.35. Zmiany stężenia bezwymiarowego znacznika –a), zależność czasu mieszania od natężenia wprowadzanego gazu (dla 95% stopnia homogenizacji) – b)

Zestawienie wybranych wyników badań przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu COS w celu określenia optymalnego położenia wylewu zanurzeniowego w krystalizatorze COS dla zadanych prędkości odlewania rozpatrywanych grup stali przedstawiono na rys. 2.36.



Rys. 2.36. Wyniki badań dla krystalizatorów 130x130 i 160x160

Na rys. 2.37 przedstawiono wyniki badań modelowych przeprowadzonych w celu wykonania oceny (jakościowej i ilościowej) charakteru przepływu ciekłej stali w kadzi pośredniej stosowanej na stalowni dla stali do ciągnięcia i/lub walcowania na zimno oraz stali do spęczania na zimno i wyciskania lub wytłaczania na zimno.



Rys. 2.37. Zmiany stężenia znacznika – a), Zestawienie wartości poszczególnych udziałów przepływów – b)

Uzyskane wyniki laboratoryjnych badań modelowych posłużyły doprecyzowaniu opracowywanych modeli numerycznych oraz stanowiły podstawę weryfikacji obliczeń CFD. Analiza i interpretacja uzyskanych wyników badań (fizycznych oraz numerycznych) pozwoliła na opracowanie założeń technologicznych produkcji stali dla analizowanych grup z uwzględnieniem:



- Pozapiecowej obróbki ciekłych stali na stanowisku pieca kadziowego (PK) (przygotowanie ciekłej stali przed i podczas spustu z pieca elektrycznego przed procesem rafinacji na stanowisku PK; kryteria rafinacji ciekłej stali podczas procesu na stanowisku PK; wytyczne dotyczące iniekcji argonu do kąpielii metalowej);
- Technologii ciągłego odlewania stali (wytyczne dotyczące modyfikacji zabudowy przestrzeni roboczej kadzi pośredniej; kryteria dotyczące segregacji osiowej węgla i innych pierwiastków we wlewkę ciągłym; wytyczne dotyczące parametrów pracy krystalizatora oraz parametrów chłodzenia (pracy) maszyny COS).

Docelowym rezultatem projektu było opracowanie założeń procesowych technologii walcowania walcówki w walcowni ciągłej Morgan, które obejmowały parametry walcowania, wytyczne dotyczące kalibrowania walców, parametry wieloetapowego chłodzenia z wykorzystaniem systemu Stelmor.

Następnym obszarem badawczym było opracowanie racjonalizacyjnej technologii zwiększenia wykorzystania w procesach hutniczych większej ilości złomu poamortyzacyjnego (druć ze zużytych opon). Dynamiczny rozwój komunikacji samochodowej oraz przewozów towarowych transportem kołowym na świecie powoduje powstawanie coraz większej ilości zużytych opon, które w znacznym stopniu obciążają środowisko naturalne. Każdego roku pozostaje duża liczba zużytych opon, które należy w sposób ekologiczny zagospodarować. Przemysł hutniczy wykorzystuje drut ze zużytych opon. Jednakże ze względu na zawartość m.in. Cu w tym materiale wsadowym stosowany jest on jedynie jako uzupełnienie wsadu podstawowego. Niekorzystne parametry fizyczne nie pozwalają na jego bezpośrednie wykorzystanie w procesie konwertorowym czy przetopie w elektrycznym piecu łukowym.

Ten obszar badań realizowany był w latach 2015-2017 w ramach projektu badawczego GEKON2/O5/268809/19/2015 pt. „Innowacyjna technologia przetwarzania drutu ze zużytych opon do postaci pełnowartościowego produktu w procesie metalurgicznym” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Projekt ten realizowany był przez konsorcjum Śląskie Towarzystwo Handlowe Kupiec S.A., Politechnikę Śląską; Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii oraz Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica.

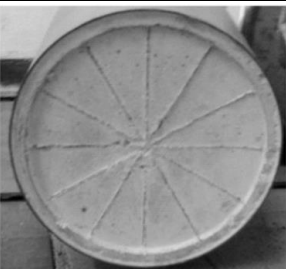
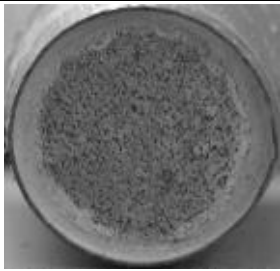
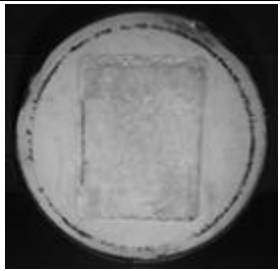
W ramach projektu zostały przeprowadzane badania eksperymentalne oraz modelowe mające na celu opracowanie i wdrożenie innowacyjnej technologii wytwarzania stali i drutów na tzw. drutówkę i kord opon, jak również na inne wyroby stalowe i staliwne spełniające najwyższe wymagania w zakresie czystości

metalurgicznej, przy maksymalnym udziale złomu drutu kordu z recyklingu zużytych opon samochodowych.

W ramach projektu w laboratorium zrealizowano jedno z zadań: „Modelowanie hybrydowe zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w kadzi do odwęglania i chemicznego dogrzewania kąpieli metalowej tlenem gazowym”, które dotyczyło między innymi modelowania fizycznego i numerycznego zjawisk hydrodynamicznych w układzie woda – powietrze, co odwzorowuje układ rzeczywisty ciekły metal – gaz. Wynikiem tych działań było opracowanie optymalnych wytycznych dla konstrukcji agregatu metalurgicznego (kadzi stalowniczej z możliwością przedmuchiwania kąpieli metalowej), oraz zaprojektowanie optymalnego sposobu wprowadzania do niej mieszaniny dwóch gazów.

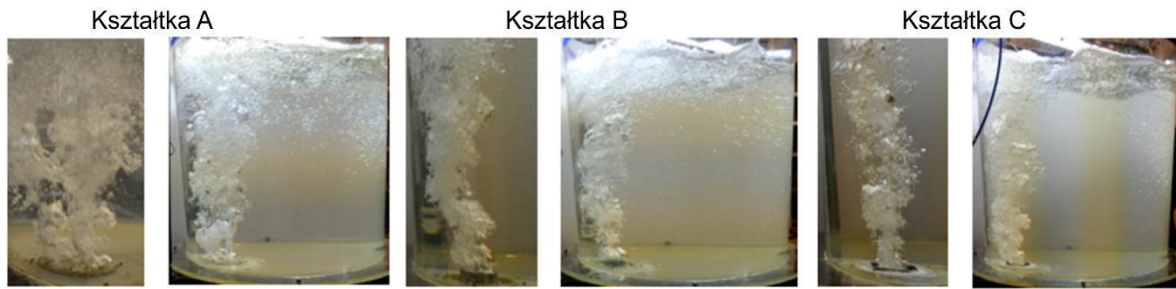
Badania modelowe w ramach tego zadania obejmowały również test różnych typów przemysłowych kształtek gazoprzepuszczalnych. Badania fizyczne przeprowadzono na modelu kadzi stalowniczej, w której istnieje możliwość zamontowania przemysłowych kształtek gazoprzepuszczalnych. Symulacje numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem programu CFD (Computational Fluid Dynamics) – ANSYS Fluent. Badano trzy typy kształtek gazoprzepuszczalnych (tab. 2.1).

Tabela 2.1.

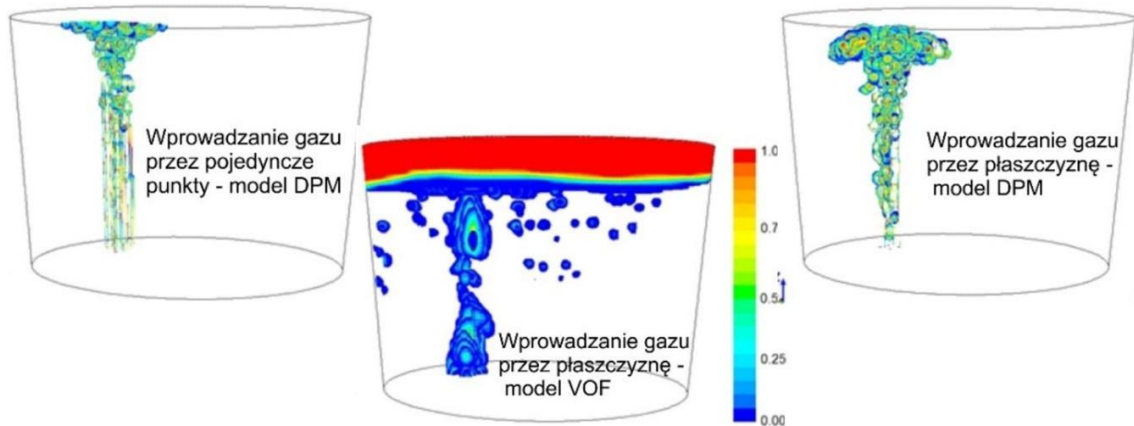
Typy kształtek przyjęte do badań			
	Kształtka		
	A	B	C
Widok			
Opis	Kształtka typu szczelinowego.	Kształtka dmuchająca poprzez porowaty segment ceramiczny.	Kształtka typu hybrydowego.

Wyniki tych badań zostały opublikowane w czasopismach oraz były prezentowane na konferencjach [49 – 54].

Wybrane wyniki badań różnych typów przemysłowych kształtek gazoprzepuszczalnych przedstawiono na rys. 2.38.

Objętościowe natężenie przepływu gazu 8 m<sup>3</sup>/h

a)



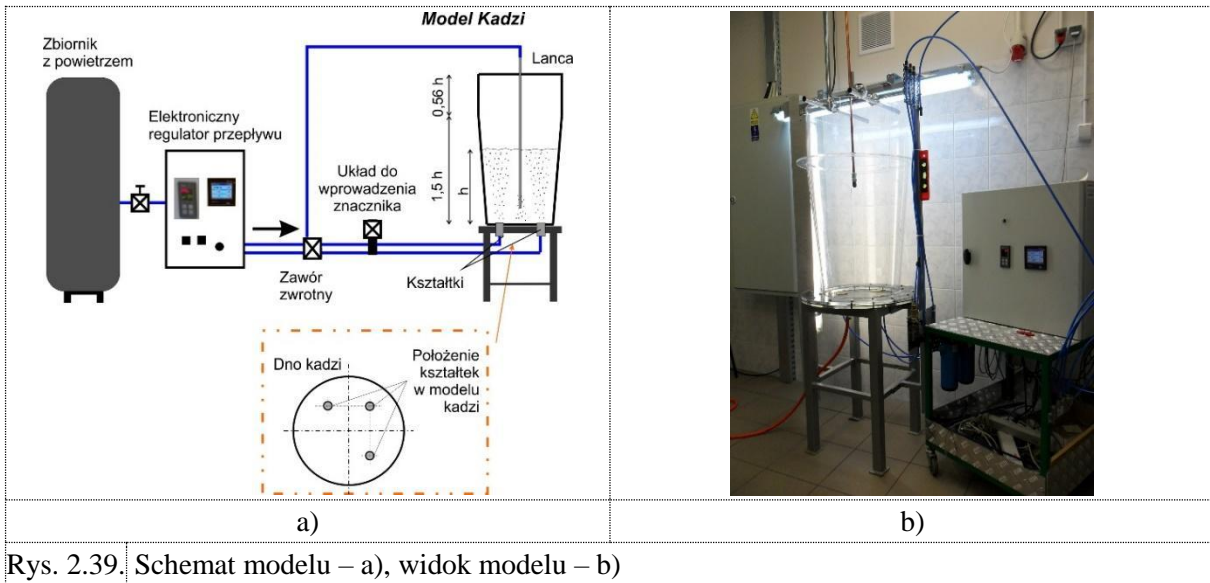
b)

Rys. 2.38. Tworzenie się pęcherzy gazowych w zależności od typu kształtki: modelowanie fizyczne – a) modelowanie CFD – b)

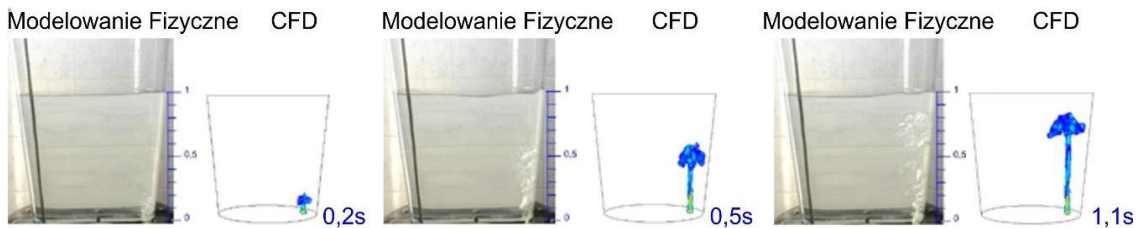
Rezultatem tego etapu badań była: weryfikacja opracowanych założeń (parametrów) procesu przedmuchiwania kąpielii metalowej przy zadanych parametrach technologicznych, wykonanie wstępnego projektu doświadczalnej kadzi stalowniczej o pojemności 3 Mg, oraz wybór odpowiedniej kształtki gazoprzepuszczalnej pod kątem prowadzonego procesu.

Zasadniczy etap badań obejmował badania modelowe (fizyczne i numeryczne) dla różnych wariantów wartości strumienia gazu oraz konfiguracją sposobu wprowadzania strumienia gazu do kadzi stalowniczej.

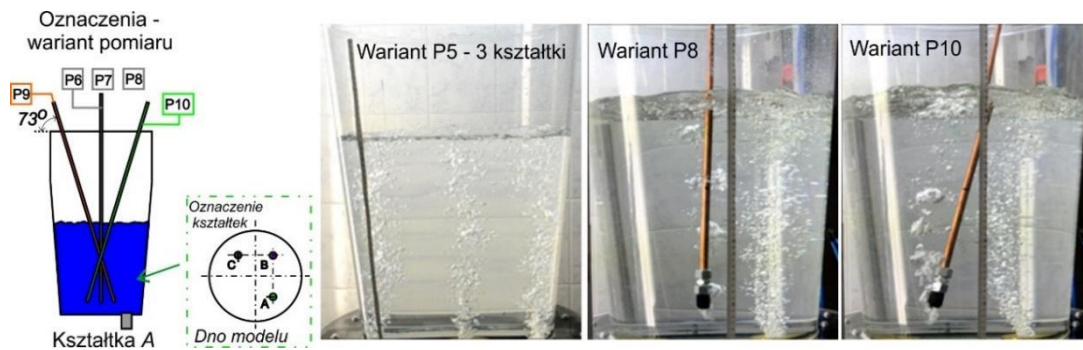
Badania modelowe przeprowadzono z wykorzystaniem zbudowanego modelu kadzi stalowniczej, w którym istnieje możliwość jednoczesnego przedmuchiwania kąpielii przez jedną, dwie lub trzy kształtki gazoprzepuszczalne zainstalowane w dnie modelu oraz dodatkowe wspomaganie dmuchania przez lancę (rys. 2.39).



Przykładowe wyniki badań, przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu fizycznego, realizacji tego etapu pokazano na rys. 2.40 – 2.41.

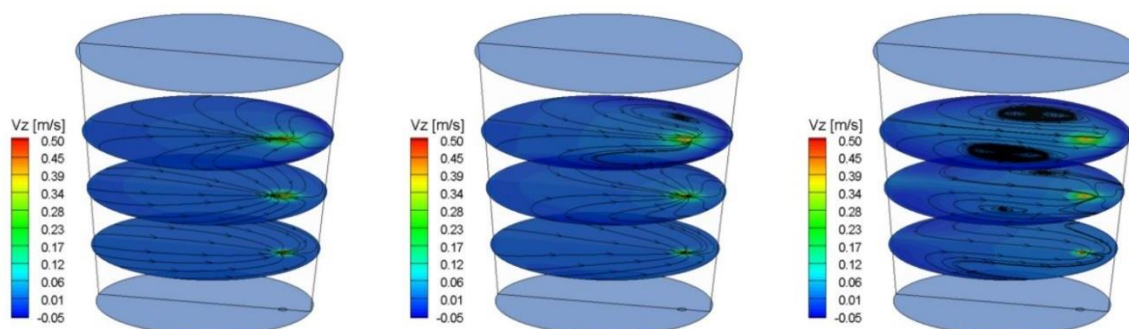


Rys. 2.40. Porównanie wyników symulacji numerycznych z danymi eksperymentalnymi



Rys. 2.41. Mechanizm powstawania stożka pęcherzyków gazu (kolumny gazowej) oraz ich stopień dyspersji w cieczy modelowej dla wybranych wariantów badań

Uzupełnienie prezentowanych badań stanowiły symulacje numeryczne, których przykładowe wyniki dla jednego z analizowanych wariantów sposobu wprowadzania gazu (kształtki; lanca) przedstawiono na rys. 2.42.



Rys. 2.42. Mapy konturowe prędkości z zaznaczonymi liniami prądu dla wybranych chwil czasu dla wybranego wariantu eksperymentu – gaz wprowadzany przez jedną kształtkę

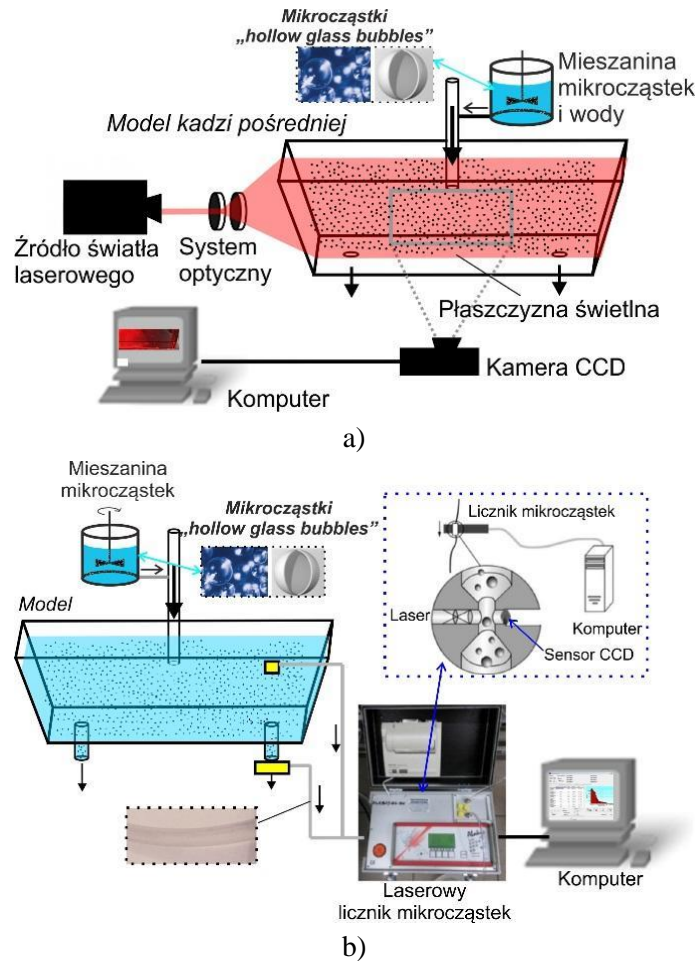
Rezultatem tego etapu badań było opracowanie wytycznych dotyczących optymalnego sposobu wprowadzania gazu do doświadczalnej kadzi stalowniczej.

Realizowane zagadnienie związane z omawianą tematyką przyczyniło się do dwóch zgłoszeń patentowych (nr P.422666 i nr P.422668 pt. „Sposób odwęglania stali”). Przedmiotem ich jest sposób odwęglania ciekłej stali, w warunkach ciśnienia atmosferycznego, mieszaniną dwóch gazów, jednego o charakterze utleniającym i drugiego o charakterze obojętnym wprowadzanych do kąpielii metalowej w kadzi stalowniczej przez kształtkę gazoprzepuszczalną umieszczoną w dnie lub przez lancę od góry.

Obecnie w ramach współpracy z Katedrą Metalurgii i Technologii Metali Politechniki Częstochowskiej realizowane są badania eksperymentalne przeprowadzane z wykorzystaniem modelu wodnego wraz analizą numeryczną, dystrybucji i separacji wtrąceń niemetalicznych w kadzi pośredniej urządzenia COS.

Badania laboratoryjne z użyciem mikrocząstek, stanowiących fazę stałą rozproszoną w wodzie, dają możliwość wyznaczenia rozkładu mikrocząstek w cieczy w zależności od ich wielkości i czasu pobytu w przestrzeni roboczej modelu. Realizowane badania dotyczą istoty przemieszczania się tych cząstek (ich dystrybucji w cieczy), co ma znaczący wpływ na efekt końcowy, którym jest usuwanie wtrąceń niemetalicznych z ciekłej stali. Celem badań jest obserwacja i analiza procesu dystrybucji mikrocząstek stałych w całej objętości modelu wodnego kadzi pośredniej, przeprowadzona na podstawie eksperymentu w warunkach ciągłego przepływu cieczy od wlewu do wylewów z modelu, z użyciem metody modelowania fizycznego oraz matematycznego, wraz z numeryczną techniką CFD ich rozwiązania.

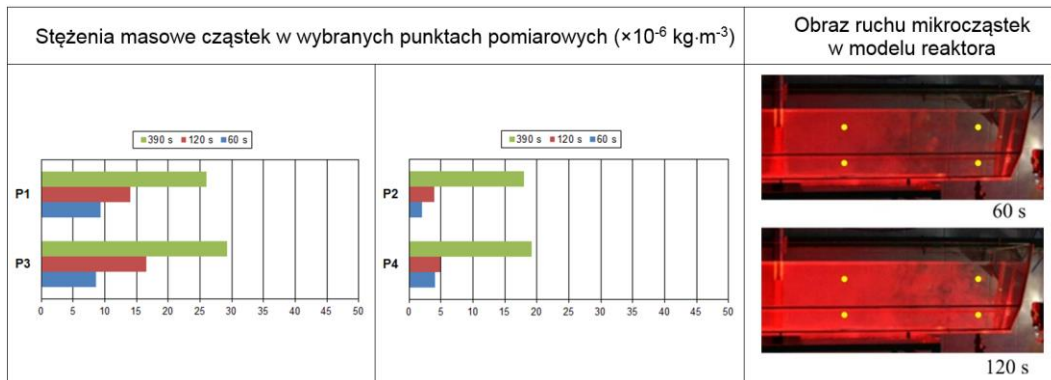
Na rys. 2.43 przedstawiono schemat ilustrujący przebieg badań eksperymentalnych dystrybucji mikrocząstek oraz pomiarów z wykorzystaniem laserowego licznika mikrocząstek.



Rys. 2.43. Schemat pomiarowy badań dystrybucji mikrocząstek – a), schemat pomiarowy z wykorzystaniem laserowego licznika mikrocząstek – b)

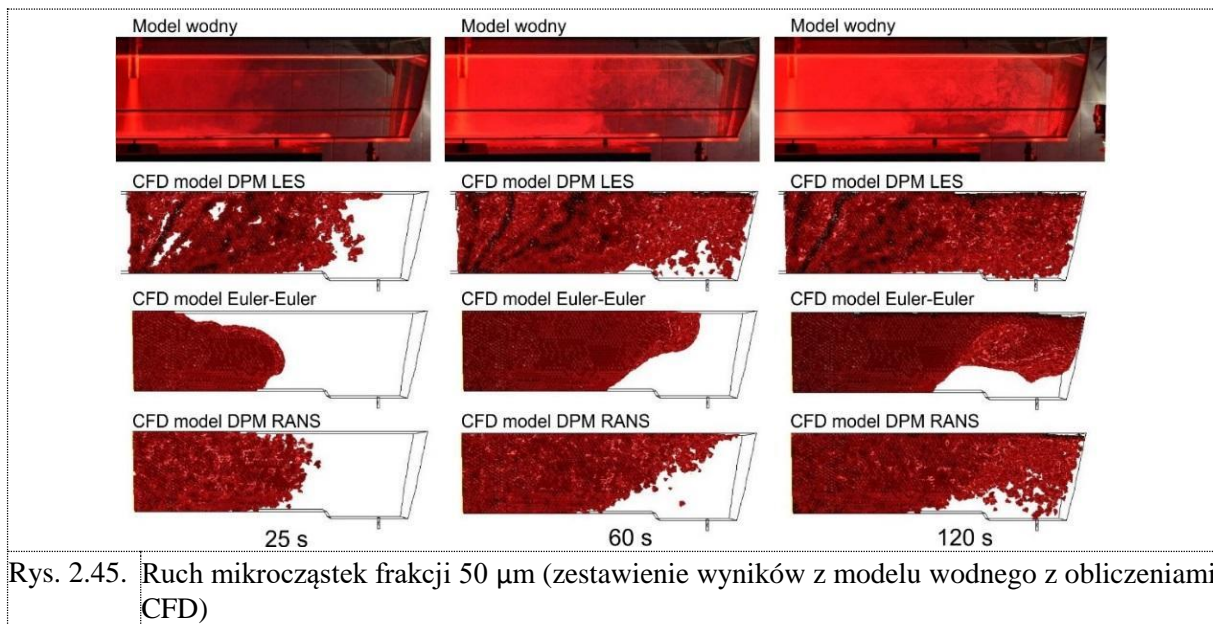
Do analizy jakościowej wykorzystuje się technikę wizualizacji, co wymaga, aby model kadzi pośredniej oświetlać wiązką światła lasera, która tworzy płaszczyznę pomiarową (tzw. nóż świetlny). Natomiast badania z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury badawczej, laserowego licznika mikrocząstek „Abakus® mobil fluid”, pozwalają na identyfikację przemieszczania się mikrocząstek w cieczy modelowej wraz z wyznaczeniem krzywych dystrybucji tych cząstek.

Efektom tej współpracy są prace [55 – 58]. Przykładowe wyniki badań laboratoryjnych z wykorzystaniem laserowego licznika mikrocząstek – rozkładu mikrocząstek w cieczy modelowej przepływającej przez model kadzi pośredniej dla wielkości mikrocząstek 20  $\mu\text{m}$  przedstawiono na rys. 2.44.



Rys. 2.44. Oznaczone stężenia mikrocząstek dla frakcji ( $20 \mu\text{m}$ ) w punktach pomiarowych

Poprawność modeli matematycznych (wariantów obliczeniowych), stosowanych w obliczeniach CFD, opisujących ruch i dystrybucję mikrocząstek w cieczy przepływającej przez kadź pośrednią zweryfikowano przez porównanie ich z wynikami pomiarów laboratoryjnych. Przykładowe zestawienie dla wielkości mikrocząstek  $50 \mu\text{m}$  przedstawiono na rys. 2.45.



Zastosowanie obu technik modelowania (eksperymentalno-numerycznej) w analizie przepływu cieczy modelowej (analogu ciekłej stali) w przestrzeni roboczej kadzi pośredniej oraz dystrybucji mikrocząstek (analogu wtrąceń niemetalicznych) w takiej przestrzeni jest wymagane w przyszłych pracach skoncentrowanych na efektywnym sposobie usuwania wtrąceń niemetalicznych z ciekłej stali. Tego typu prace powinny być zrealizowane, ze względu na oczekiwane efekty optymalizacji przepływów ciekłej stali w kadzi pośredniej (poprzez zastosowane w jej przestrzeni roboczej urządzeń sterowania przepływem – podstrumieniowych inhibitorów

turbulencji, tam czy filtrów ceramicznych), z punktu widzenia poprawy czystości metalurgicznej produkowanych stali, wskutek zmniejszenia ilości wtrąceń niemetalicznych w gotowym wyrobie.

## **2.4. Badania modelowe procesów rafinacji aluminium**

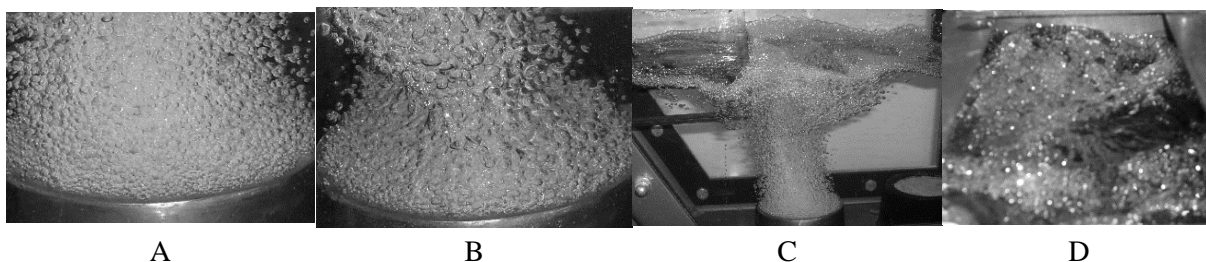
Kolejnym obszarem badawczym dotyczącym zakresu modelowania realizowanym w Laboratorium Badań Modelowych jest proces rafinacji aluminium. Obecnie jedną z najbardziej popularnych metod jest barbotaż czyli przedmuchiwanie ciekłego metalu gazami obojętnymi zwłaszcza argonem. W omawianym procesie rafinujący gaz obojętny wprowadzany jest do ciekłego metalu poprzez lance, porowate kształtki gazoprzepuszczalne oraz rotory. Proces rafinacji jest skuteczny, gdy w całej objętości ciekłego metalu obserwuje się dyspersję równomierną (wymieszanie) rozproszonych pęcherzyków gazowych. Aby tak się stało, proces należy prowadzić dobierając odpowiednio parametry procesowe takie jak: natężenie przepływu gazu czy prędkość obrotową rotora. Dobór jednakże tych parametrów w warunkach przemysłowych nie jest prosty ze względu na ich kosztochłonność i czasochłonność. Dlatego też bardzo częstym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie modelowania fizycznego uzupełnionego o modelowanie numeryczne. Omawianego obszaru badań dotyczyły projekty badawcze Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego:

- 3T08B 06829: Model matematyczny do sterowania procesem rafinacji ciekłych stopów aluminium przy zastosowaniu URC – 7000, realizowany w latach 2006-2008,
- N N508 443236: Hydrodynamika procesu rafinacji ciekłych stopów metali, realizowany w latach 2009-2012,
- oraz grant promotorski:
- BW/RGH-16/RM-0/2008: Hydrodynamika procesu barbotażu na przykładzie rafinacji stopów aluminium, realizowany w latach 2008-2009.

W ramach projektu 3T08B 06829 pt. Model matematyczny do sterowania procesem rafinacji ciekłych stopów aluminium przy zastosowaniu URC-7000 opracowano model matematyczny do opisu procesu rafinacji aluminium i jego stopów poprzez dobór i selekcję parametrów termodynamicznych i kinetycznych. Przeprowadzono weryfikację wyników otrzymanych na podstawie symulacji matematycznej poprzez porównanie ich z danymi doświadczalnymi dla stopów AlSi9 oraz AlSi9Cu3(Fe). Ponadto badano wpływ natężenia przepływu gazu na stopień dyspersji pęcherzyków gazowych w cieczy w reaktorze z kształtkami gazoprzepuszczalnymi z wykorzystaniem

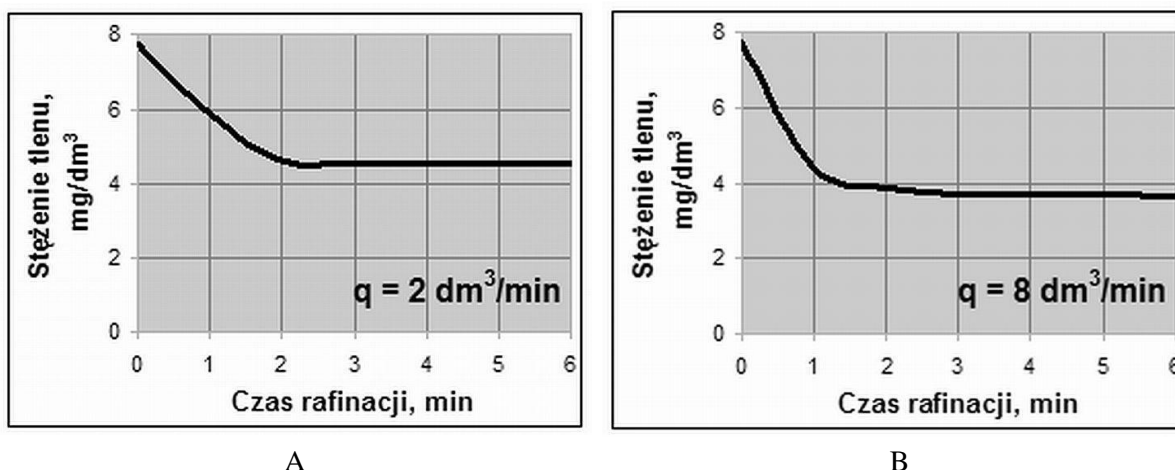




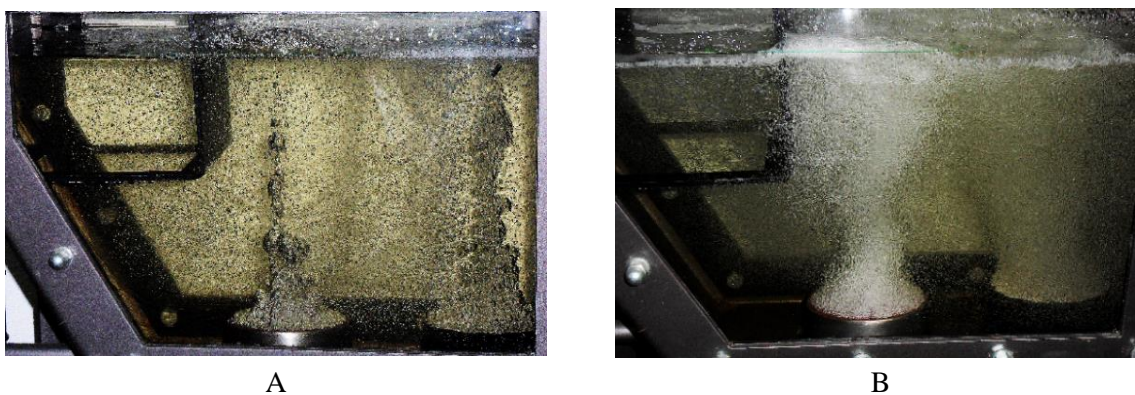


Rys. 2.48. Przykładowe wyniki badań wizualizacji dla reaktora URC-7000: A) przybliżenie dyszy przy natężeniu przepływu gazu  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$ , B) przybliżenie dyszy przy natężeniu przepływu gazu  $30 \text{ dm}^3/\text{min}$ , C) powierzchnia cieczy – widok z boku przy natężeniu przepływu gazu  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$ , D) powierzchnia cieczy – widok z góry przy natężeniu przepływu gazu  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$

Dla reaktora URC-7000 dodatkowo przeprowadzono badania z użyciem innego medium modelującego niż woda, zastosowano glicerynę oraz roztwór gliceryny: 80%, 60%, 40%, 20%. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 2.50.

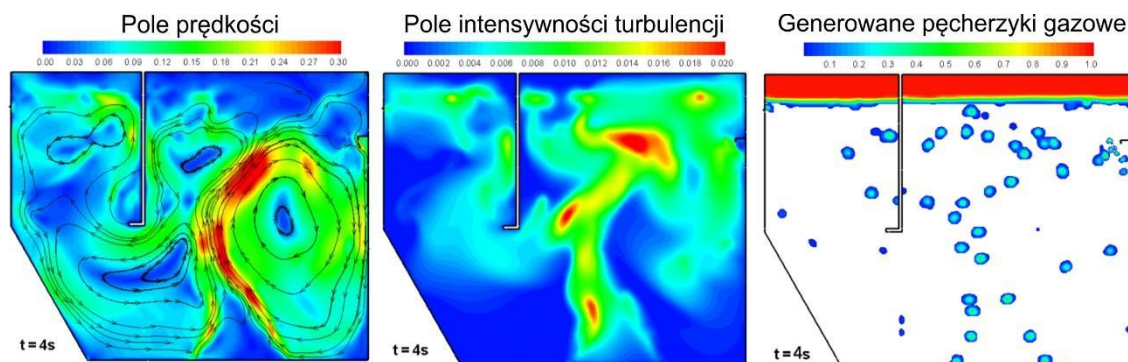


Rys. 2.49. Przykładowe wyniki pomiarów usuwania tlenu z wody jako analogii usuwania wodoru z ciekłego aluminium dla reaktora URC-7000 przy natężeniu przepływu gazu: A)  $2 \text{ dm}^3/\text{min}$  B)  $8 \text{ dm}^3/\text{min}$



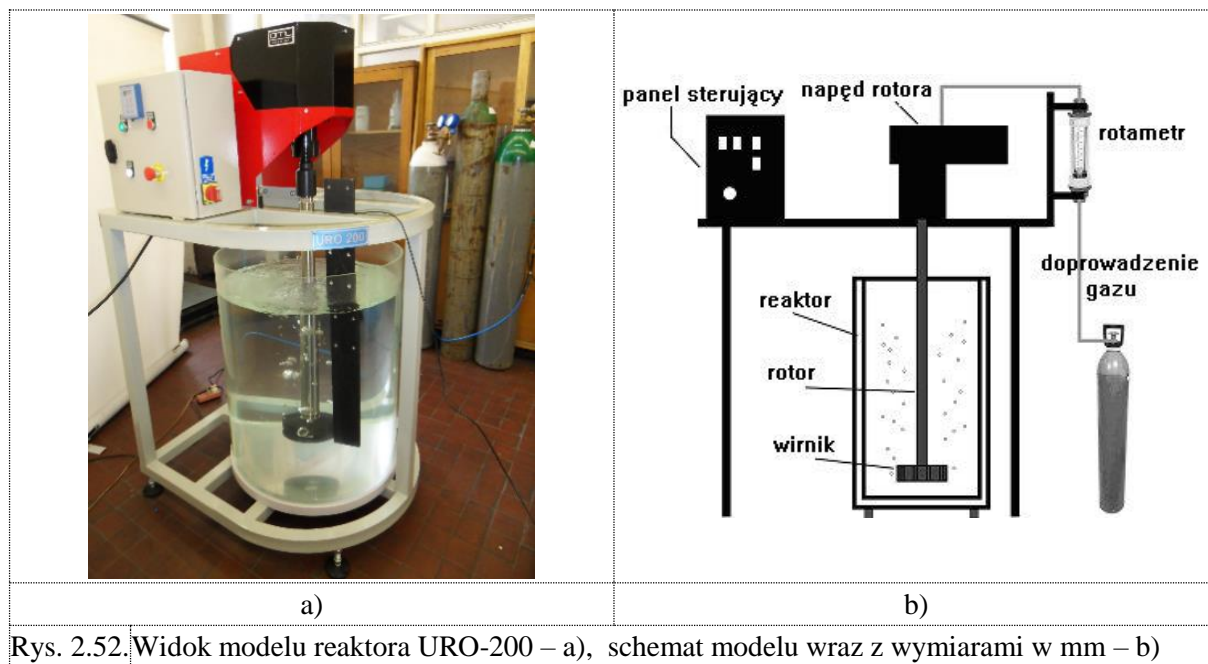
Rys. 2.50. Przykładowe wyniki pomiarów wizualizacji stopnia dyspersji dla reaktora URC-7000 przy natężeniu przepływu gazu  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$  z wykorzystaniem gliceryny jako medium modelującego: A) czysta gliceryna, B) 60% roztwór gliceryny

Dla reaktora URC-7000 przeprowadzono także symulacje numeryczne przy użyciu modelu VOD. W wyniku obliczeń otrzymano prognozowane rozkłady pól prędkości, intensywność turbulencji i objętość argonu w jednostce objętości cieczy dla badanych wariantów przepływu. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 2.51.



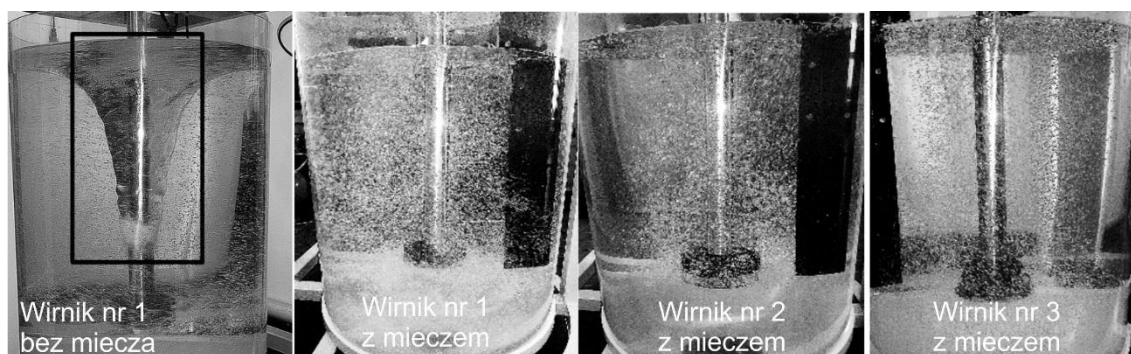
Rys. 2.51. Przykładowe wyniki symulacji numerycznych prowadzonych dla reaktora URC-7000 przy natężeniu przepływu gazu  $20 \text{ dm}^3/\text{min}$

W ramach projektu N N508 443236 „Hydrodynamika procesu rafinacji ciekłych stopów metali” zbudowano stanowisko badawcze do modelowania fizycznego procesów zachodzących w reaktorze rafinującym cyklicznym URO-200. Model zbudowano w skali 1:1, na rys. 2.52 przedstawiono widok wspomnianego stanowiska badawczego.



Rys. 2.52. Widok modelu reaktora URO-200 – a), schemat modelu wraz z wymiarami w mm – b)

Na modelu tym można testować zachowanie się generowanych pęcherzyków gazowych przez różnego rodzaju wirniki zamontowane na wale rotora oraz określić ich stopień wymieszania w cieczy przy różnych parametrach procesowych. Wyniki opisywanej tematyki prezentowano na konferencjach i opublikowano w czasopiśmie [68 – 76]. Na rys. 2.53 przedstawiono przykładowe wyniki wizualizacji dla kilku testowanych rodzajów wirników.



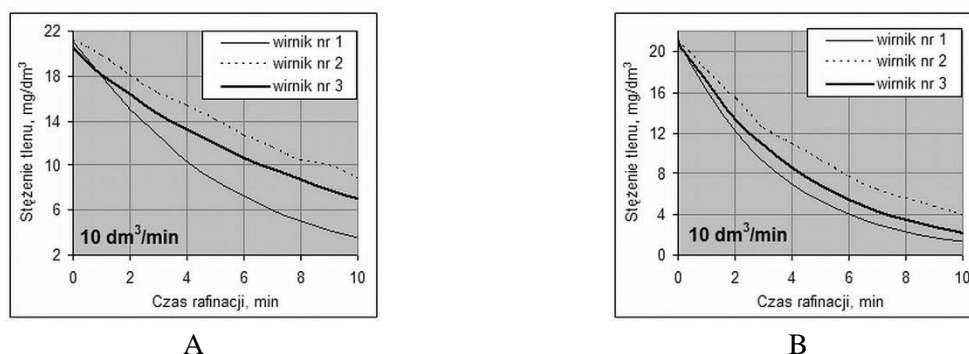
Rys. 2.53. Przykładowe wyniki badań wizualizacji stopnia dyspersji dla reaktora URO-200 przy natężeniu przepływu gazu  $10 \text{ dm}^3/\text{min}$  i prędkości obrotowej rotora  $350 \text{ obr}/\text{min}$

Rys. 2.54 przedstawia przykładowe wyniki generowanych pęcherzyków gazowych (przy natężeniu przepływu gazu  $5 \text{ dm}^3/\text{min}$ , prędkości obrotowej rotora  $200 \text{ obr}/\text{min}$ ). Na tej podstawie można stwierdzić przy jakich parametrach procesowych otrzymuje się drobne pęcherzyki gazowe.



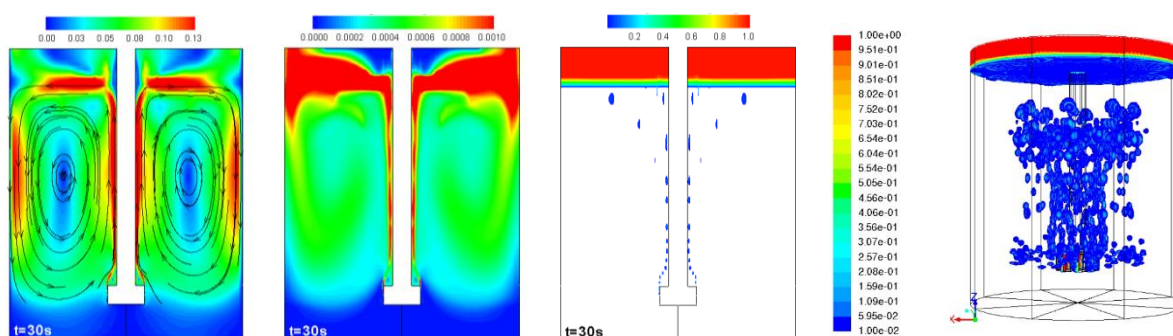
Rys. 2.54. Przykładowe wyniki generowanych pęcherzyków gazowych otrzymanych w ramach badań wizualizacji stopnia dyspersji dla reaktora URO-200 dla wirnika: A) nr 2, B) nr 3

Dodatkowo przeprowadzono badania usuwania tlenu z wody dla badanych wirników. Pozwoliło to potwierdzić efektywność pracy wirnika nr 1 oraz określić minimalny czas rafinacji. Przykładowe wyniki tych badań przedstawiono na rys. 2.55.



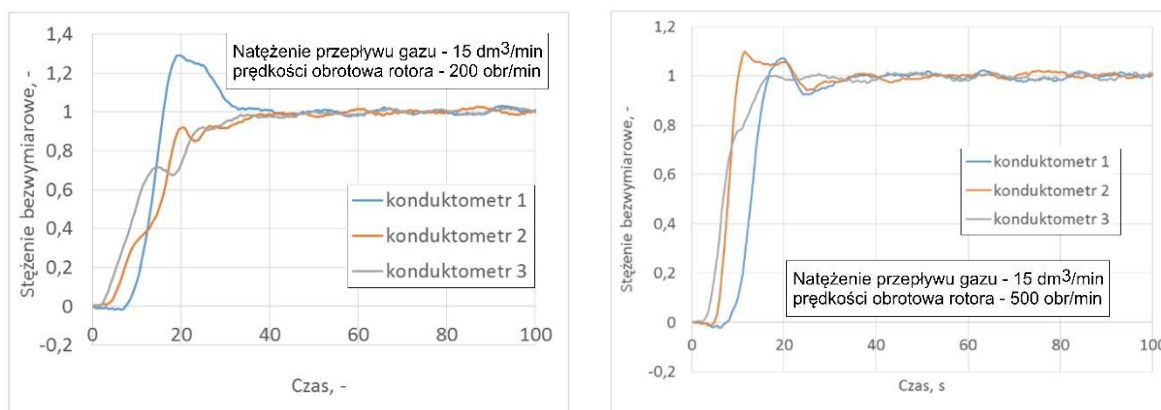
Rys. 2.55. Przykładowe wyniki pomiarów usuwania tlenu z wody jako analogii usuwania wodoru z ciekłego aluminium dla reaktora URO-200: A) 300 obr/min B) 500 obr/min

Dla reaktora URO-200 przeprowadzono także symulacje numeryczne w komercyjnym programie ANSYS Fluent z wykorzystaniem modeli wielofazowych. Obliczenia numeryczne obejmowały różne parametry procesowe oraz geometrie rotorów. Na rys. 2.56 przedstawiono przykładowe wyniki tychże symulacji numerycznych 2D i 3D.



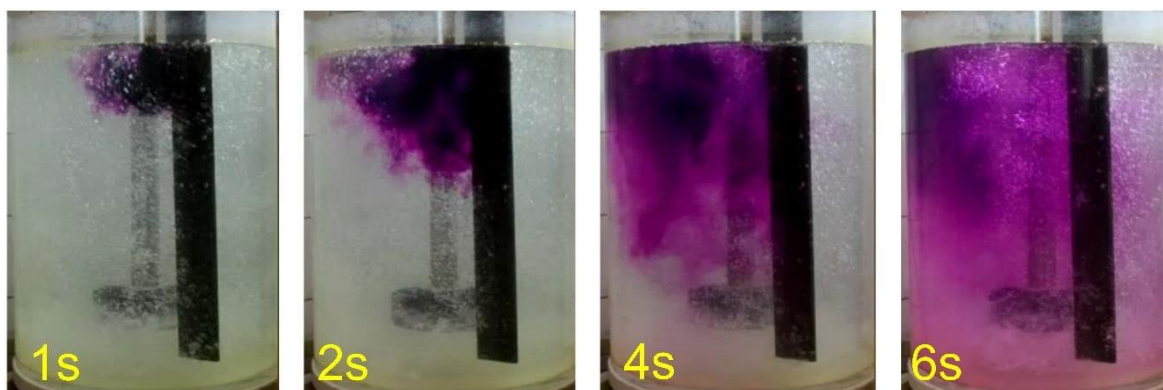
Rys. 2.56. Przykładowe wyniki symulacji numerycznych przeprowadzonych dla reaktora URO-200 przy natężeniu przepływu gazu  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$ , prędkości obrotowej rotora 350 obr/min

Najnowsze badania dotyczące modelowania fizycznego procesu rafinacji aluminium rozszerzono o wykreślenie krzywych RTD na podstawie zmian przewodności w cieczy po dodaniu znacznika (roztwór NaCl) oraz przeliczeniu otrzymanych wartości na stężenie bezwymiarowe, by wyniki dla różnych wirników mogły być porównywalne, przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 2.57.



Rys. 2.57. Przykładowe krzywe RTD wykreślone dla reaktora URO-200

Ponadto przeprowadzono także badania wizualizacji stopnia dyspersji pęcherzyków gazowych w cieczy z wykorzystaniem kolorowego znacznika ( $\text{KMnO}_4$ ), co pozwoliło na określenie czasu wymieszania znacznika w całej objętości cieczy. Jest on zawarty w przedziale od 6 do 40 s dla różnych parametrów procesowych i wirników. Wyniki tych badań zostały opublikowane w artykułach [77, 78], a przykładowe zdjęcia wymieszania znacznika w cieczy (przy natężeniu przepływu gazu  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$  i prędkości obrotowej rotora  $300 \text{ obr}/\text{min}$ ) przedstawiano na rys. 2.58.



Natężenie przepływu gazu –  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$ , prędkość obrotowa rotora –  $300 \text{ obr}/\text{min}$

Rys. 2.58. Przykładowe wyniki wizualizacji stopnia wymieszania znacznika w całej objętości cieczy dla reaktora URO

## 2.5. Podsumowanie

Badania modelowe są obecnie powszechnie stosowane i stanowią cenne źródło informacji o zjawiskach zachodzących w trakcie procesów metalurgicznych. Umożliwiają to wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań technologicznych stanowiących fundament rozwoju całego przemysłu metalurgicznego. Laboratorium Badań Modelowych na

przeżyciu lat ma istotny w tym udział. Poza wspomnianymi w rozdziale monografii zrealizowanymi projektami finansowanymi ze źródeł zewnętrznych prowadzone są również prace badawcze w ramach środków na Wydziałowe badania statutowe tj. BK-339/RM1/2011 (Nowoczesne techniki i technologie w procesach otrzymywania i recyklingu metali, energetyce przemysłowej i ochronie środowiska); BK-340/RM1/2012 (Doskonalenie technologii procesu ciągłego odlewania stali); BK-210/RM2/2013 (Doskonalenie procesów otrzymywania i rafinacji metali); BK-220/RM2/2014 (Nowoczesne technologie i techniki badawcze w procesach otrzymywania, przetwarzania i recyklingu metali i ich stopów); 11/020/BK\_15/0024 (Nowoczesne technologie i techniki badawcze w procesach otrzymywania, przetwarzania i recyklingu metali i ich stopów); 11/020/BK\_16/0039 (Doskonalenie technologii i technik badawczych w procesach otrzymywania, przetwarzania i recyklingu metali i ich stopów); 11/990/BK\_17/0045 (Doskonalenie metod wytwarzania materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych); 11/990/BK\_18/0057 (Doskonalenie metod wytwarzania materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych); 11/990/BK\_19/0063 (Doskonalenie metod wytwarzania materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych).

Oprócz prowadzenia prac naukowo-badawczych Laboratorium stanowi również cenne narzędzie dydaktyczne umożliwiające w sposób ciekawy, atrakcyjny i efektywny realizowanie zajęć dla studentów w ramach projektów inżynierskich, prac magisterskich oraz doktorskich, a także bieżącego procesu nauczania.

Wieloletnie doświadczenia w zakresie projektowania, budowy oraz wykorzystywania modelowania fizycznego do badań zjawisk zachodzących w trakcie procesów przemysłowych, spowodowało dynamiczny rozwój tych prac w ostatnich latach. Efektem tego jest przeprowadzona modernizacja Laboratorium Badań Modelowych, która potwierdziła słuszność dokonanych założeń zarówno z punktu widzenia funkcjonalności, jak i bezpieczeństwa pracy. Ma to istotne znaczenie nie tylko dla prowadzonych badań naukowych, ale również dla prowadzonego procesu dydaktycznego. W Laboratorium zrealizowano trzy podstawowe założenia: kompaktowość, uniwersalność, mobilność.

Pod pojęciem kompaktowości należy rozumieć zwartość zestawu urządzeń kontrolno-pomiarowych stanowiących jeden wielofunkcyjny moduł sterujący, w którym można instalować i rozbudowywać poszczególne elementy aparatury. Pod pojęciem uniwersalności rozumie się szeroki zakres stosowalności projektowanej aparatury kontrolno-pomiarowej. Spełnia ona wymagania różnych stanowisk badawczych. Dotyczy to zarówno stanowisk zlokalizowanych w sekcji piecowej

i obróbki pozapiecowej, jak i w sekcji COS oraz rafinacji aluminium. Mobilność to łatwość zmiany lokalizacji całego zestawu oraz prosty sposób jej podłączenia do poszczególnych modeli fizycznych.

## **Bibliografia**

1. Panic B., Król L., Dankmeyer-Łączny J., The investigations of gas-powder two phase flow in packed bed, *Steel Research*, 8, 2000, s. 271-276.
2. Panic B., Król L., Dankmeyer-Łączny J., Główne przyczyny występujące podczas zaburzeń przepływu dwufazowego (gaz+pył) przez złożę kawałkowe, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 9, 2001, s. 319-323.
3. Panic B., Badanie przepływu przez złożę kawałkowe gazu obciążonego pyłem, rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
4. Panic B., Dankmeyer-Łączny Ł., Badania przepływu dwufazowego gaz –pył przez ruchome (schodzące) złożę kawałkowe, *Acta Metallurgica Slovaca*, 3, 2004, s. 148-151.
5. Panic B., Dankmeyer-Łączny J., Badania przepływu dwufazowego gaz-pył przez schodzące złożę kawałkowe, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 5, 2006, s. 201-204.
6. Panic B., Dankmeyer-Łączny J., Badania przepływu gazu niosącego pył przez ruchome (schodzące) złożę kawałkowe, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 4, 2006, s. 38.
7. Panic B., Dankmeyer-Łączny J., Dwufazowy przepływ gaz-pył przez ruchome złożę kawałkowe – wyniki badań modelowych, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 5, 2007, s. 236-238.
8. Panic B., Dankmeyer-Łączny J., Gas-powder two phase flow In descending bed – the influence of bed type and powder type, *Acta Metallurgica Slovaca*, 5. 2007, s. 111-114.
9. Panic B., Dankmeyer-Łączny J., Równania opisujące opory oddziaływania gaz-pył-złożę przy przepływie gazu wraz z pyłem przez ruchome złożę kawałkowe, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 5, 2008, s. 228-231.
10. Panic B., Dankmeyer-Łączny J., Badania modelowe procesu osiadania pyłu wielkopieczowego w strukturze porowatej schodzącego złoża koksu, przy przepływie dwufazowym (gaz+pył), *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 5, 2009, s. 38-40.



11. Panic B., Dankmeyer-Łączny J., Badania modelowe przepływu gazu z pyłem przez warstwy kawałkowe w piecach szybowych, Rozdział w monografii Polska metalurgia w latach 2006-2010, Wydaw. Naukowe Akapit, Kraków 2010.
12. Panic B., Physical and mathematical modeling of phenomena proceeding with gas – powder two phase flow through moving packed bed in metallurgical shaft furnaces, *Metalurgija*”, 50 (3), 2011, s.183-187.
13. Panic B., Model investigations 3D of gas-powder two phase flow in descending bed with consideration radial distribution of flow, *Metalurgija*, 52 (2), 2013, s.177-180.
14. Panic B., Influence of bed particle size on gas-powder two phase flow conditions in descending packed bed. Model investigation (3D physical model), *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 55 (2), 2012, s.567-572.
15. Panic B., Modelowanie zjawisk zachodzących przy dwufazowym – gaz+pył – przepływie przez ruchome złoża kawałkowe, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
16. Panic B.; Janiszewski K., Model investigations 3D of gas-powder two phase flow in descending packed bed in metallurgical shaft furnaces, *Metalurgija*, 53 (3), 2014, s. 331-334.
17. Panic B., Influence of the bed type on the flow resistance change during the two phase (gas + powder) flow through the descending packed bed, *Archives of Metallurgy and Materials*, 59 (2), 2014, s. 795-800.
18. Panic B., Mathematical Model of Gas, Powder and Bed Flow in Metallurgical Shaft Furnaces, *Archives of Metallurgy and Materials*, 61 (1), 2016, s. 227-232.
19. Panic B., 3D model studies on the effect of bed and powder type upon radial static pressure and powder distribution in metallurgical shaft furnaces, *Archives of Metallurgy and Materials*, 62 (3), 2017, s. 1449-1452.
20. Panic B., 3D model study of radial distribution of powder holdup in the descending packed bed of metallurgical shaft furnaces, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2018, 63 (2), s. 999-1002.
21. Bulkowski L., Galisz U., Kania H., Widerman J., Kudliński Z., Pieprzyca J., Lipiński J., Technologia rafinacji ciekłego metalu za pomocą filtrów ceramicznych, *Prace IMŻ* 63 (2), 2011, s. 7-20.
22. Merder T., Pieprzyca J., Kudliński Z., Bulkowski L., Galisz U., Kania H., Modelowanie przepływu stali w kadzi pośredniej urządzenia COS w stalowni Baildon Gonar-Bis Sp.z o.o., *Hutnik* 76 (3), 2009, s. 178-184.

23. Kudliński Z., Pieprzyca J., Merder T., Bulkowski L., Galisz U., Kania H., Modelowanie przepływu w czasie rafinacji stali filtrami wielootworowymi w kadzi pośredniej urządzenia COS Wydziału Stalowni Baildon Gonar-Bis Sp. z o.o., 25 Celostátní Konference „Teorie a Praxe Výroby a Zpracování Oceli”, Rožnov pod Radhoštěm, Republika Czeska, 2009, s. 88-93.
24. Merder T., Pieprzyca J., Modelowanie fizyczne i numeryczne przepływu w kadzi pośredniej, Hutnik, 75 (5), 2008 s. 207-211.
25. Kania H., Pieprzyca J., Modelowanie fizyczne mieszania ciekłej stali gazami obojętnymi w trójwylewkowej kadzi pośredniej urządzenia COS, Prace IMŻ 64 (2), 2012, s. 8-13.
26. Merder T., Pieprzyca J., Kania H., Ochab K., Wende R., Analiza warunków pracy trzy-żyłowej kadzi pośredniej z zastosowaniem techniki CFD, Hutnik, 78 (3), 2011, s. 224-227.
27. Kapturkiewicz W., Burbelko A., Kudliński Z., Pieprzyca J., Modelowanie komputerowe krzepnięcia półprzemysłowego wlewka stacjonarnego z wykorzystaniem oprogramowania ProCAST, Prace IMŻ 64 (1), 2012, s. 54-60.
28. Merder T., Modelling study of the influence of subflux controller of turbulence on the molten steel flow in tundish, Materials Science Forum, 654-656, 2010, s. 1557-1560.
29. Merder T., Pieprzyca J., Numerical modeling of the influence subflux controller of turbulence on steel flow in the tundish, Metalurgija, 50 (4), 2011, s. 223-226.
30. Warzecha M., Merder T., Pfeifer H., Pieprzyca J., Investigation of flow characteristics in a six-strand cc tundish combining plant measurements, physical and mathematical modeling, Steel Research International, 81 (11), 2010, s. 987-993.
31. Merder T., Pieprzyca J., Optimization of two-strand industrial tundish work with use of turbulence inhibitors: physical and numerical modelling, Steel Research International, 83 (10), 2012, s. 1029-1038.
32. Warzecha M., Merder T., Warzecha P., CFD modelling of non-metallic inclusions removal process in the T-type tundish, Journal of Achievements of MATERIALS and Manufacturing Engineering, 55 (2), 2012, s. 590-595.
33. Merder T., Warzecha M., Optimization of a six strand CC tundish: industrial measurements and numerical investigation of the tundish modifications, Metallurgical and Materials Transactions B, 43 (4), 2012, s. 856-868.

34. Warzecha M., Merder T., Numerical analysis of the non-metallic inclusions distribution and separation in a two-strand tundish, *Metalurgija*, 52 (2), 2013, s. 153-156.
35. Merder T., Effect of casting flow rate on steel flow phenomena in tundish, *Metalurgija*, 52 (2), 2013, s. 161-164.
36. Merder T., The influence of the shape of turbulence inhibitors on the hydrodynamic conditions occurring in a tundish, *Archives of Metallurgy and Materials*, 58 (4), 2013, s.1111-1117.
37. Merder T., Pieprzyca J., Saternus M., Analysis of residence time distribution (RTD) curves for T-type tundish equipped in flow control devices, physical modeling, *Metalurgija*, 53 (2), 2014, s. 155-158.
38. Pieprzyca J., Merder T., Michałek K., Construction of a RH device's physical model, 21th International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2012), Brno, Czech Republic, 2012, s. 45-56.
39. Pieprzyca J., Merder T., Saternus M., Tkadlečková M., Gryc K., Socha L., Badania modelowe wpływu rozmieszczenia dysz w króćcu ssącym urządzenia RH na szybkość obiegu stali, 32 Konferencja Teorie a praxe výroby a zapracovani oceli, Rožnov p. Radhoštěm, Czech Republic, 2016, s. 93-99.
40. Pieprzyca J., Merder T., Saternus M., Michalek K., Physical modelling of the steel flow in RH apparatus, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60 (3), 2015, s. 1859-1863.
41. Pieprzyca J., Merder T., Warzecha M., Skorupa J., The influence of steel preheating level in the tundish on the primary structure of A continuously cast ingot, *Metalurgija*, 54 (1), 2015, s. 127-130.
42. Pieprzyca J., Merder T., Jowša J., Method for determining the time constants characterizing the intensity of steel mixing in continuous casting tundish, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60 (1), 2015, s. 245-249.
43. Merder T., Pieprzyca J., Warzecha M., Warzecha P., Flow and mixing of liquid steel in multi-strand tundish delta type – physical modeling, *Metalurgija*, 54 (1), 2015, s. 123-126.
44. Pieprzyca J., Kudliński Z., Merder T., Effect of temperature fields heterogeneity in the tundish on primary structure of continuously cast ingots, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60 (1), 2015, s. 227-233.
45. Pieprzyca J., Merder T., Saternus M., Optymization of submerged entry nozzle depth in CC mould, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60 (4), 2015, s. 2927-2931.

46. Merder T., Warzecha M., Warzecha P., Large-eddy simulations of a flow characteristic in a multi-strand continuous casting tundish, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60 (4), 2015, s. 2923-2926.
47. Pieprzyca J., Kudliński Z., Merder T., Badania modelowe przepływu ciekłej stali w wielowylewowej kadzi pośredniej urządzenia COS, *Konferencja Teorie a praxe vyroby a zapracovani oceli 2014*, Karlova Studanka, Czech Republic 2014, s. 54-60.
48. Merder T., Warzecha M., Pieprzyca J., Warzecha P., Garncarek S., Assessment of changes in casting speed at operated tundish during casting of a high carbon steels, *46th International October Conference on Mining and Metallurgy*, 01-04 October 2014, Bor Lake, Serbia, 2014, s. 35-39.
49. Merder T., Pieprzyca J., Warzecha M., Warzecha P., Application of high flow rate gas in the process of argon blowing through steel, *Archives of Metallurgy and Materials*, 62 (2A), 2017, s. 905-910.
50. Merder T., Warzecha P., Warzecha M., Pieprzyca J., Moycho J., Wpływ typu kształtki gazoprzepuszczalnej na dyspersję gazu w kąpeli stalowej, *Hutnik*, 83 (11), 2016, s. 501-503.
51. Pieprzyca J., Merder T., Warzecha M., Zdonek B., Bielański L., Przedmuchiwanie ciekłej stali w kadzi przy dużych natężeniach przepływu gazu – modelowanie fizyczne, *Hutnik*, 83 (11), 2016, s. 498-500.
52. Warzecha M., Warzecha P., Merder T., Pieprzyca J., Mazurkiewicz J., Analiza wpływu zastosowanego modelu matematycznego na prognozowaną dyspersję gazu w kąpeli stalowej, *Hutnik*, 83 (11), 2016, s. 487-490.
53. Merder T., Pieprzyca J., Warzecha M., Modelling research of high gas flow rate blowing of the liquid steel in the ladle unit, *Conference: 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2016)*, Brno, Czech Republic, May 25th - 27th 2016, s. 210-215.
54. Merder T., Pieprzyca J., The influence of porous plug type on argon blowing process, *26th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2017)*, May 24th - 26th 2017, Brno, Czech Republic, s. 188-193.
55. Warzecha M., Hutny A.M., Merder T., Jędrysiak B., Methodology of inclusions removing from steel flowing through the tundish, *Metalurgija*, 56 (3-4), 2016, s. 291-293.
56. Jędrysiak B., Merder T., Adaptacja wodnego modelu urządzenia COS do prowadzenia badań dotyczących flotacji wtrąceń niemetalicznych, *Hutnik*, 82 (10), 2015, s. 651-654.

57. Merder T., Warzecha M., Pieprzyca J., Jowsa J., Warzecha P., Garncarek S., Niepublikowany raport z realizacji badań modelowych projekt badawczy NCN nr 2013/09/B/ST8/00143, 2017.
58. Merder T., Modelowanie numeryczne i fizyczne rozkładu wtrąceń niemetalicznych podczas przepływu ciekłej stali przez kadź pośrednią urządzenia COS, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2018.
59. Saternus M., Obcarski M., Botor J., Physical model of the barbotage process of aluminium, Archives of Metallurgy and Materials, 51 (2), 2006, s. 289-297.
60. Saternus M., Botor J., Physical model of aluminium refining process in URC-7000, Metalurgija, 48 (3), 2009, s. 175-179.
61. Saternus M., Botor J., Refining process of aluminium conducted in continuous reactor – physical model, Archives of Metallurgy and Materials, 55 (2), 2010, s. 463-475.
62. Saternus M., Merder T., Warzecha P., Numerical and physical modelling of aluminium barbotage process, Solid State Phenomena, 176, 2011, s. 1-10.
63. Saternus M., Botor J., Physical model of aluminium barbotage process in URC-7000 reactor, Acta Metallurgica Slovaca 13 (5), 2007, s. 467-470.
64. Saternus M., Botor J., Wężyk W., Stuczyński T., Rafinacja aluminium w sposób ciągły – reaktor URC – 7000, Rudy i Metale Nieżelazne, 50 (4), 2005, s. 169-173.
65. Saternus M., Botor J., Wężyk W., Modelling of aluminium refining process in the continuous reactor, International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting LMPC 2007, edited by P.L. Lee, A. Mitchell, J.-P. Bellot, A. Jardy, SF2M, Nancy, Francja, 2007, s. 313-318.
66. Saternus M., Botor J., Physical and mathematical model of aluminium refining process in the URC-7000 reactor, International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, Peter D. Lee, A. Mitchell and Rod Williamson Ed. TMS, Santa Fe, USA, 2009, s. 371-380.
67. Saternus M., Rafinacja aluminium i jego stopów przez przedmuchiwanie argonem, Monografia, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechnika Śląska, 2011.
68. Saternus M., Modelling research of hydrogen desorption from liquid aluminium and its alloys, Metalurgija, 50 (4), 2011, s. 257-260.
69. Saternus M., Botor J., Physical model of aluminium refining process in the batch and continuous reactors, Materials Science Forum, 654-656, 2010, s. 1553-1556.

70. Saternus M., Botor J., The physical and mathematical model of aluminium refining process in reactor URO-200, Sohn International Symposium Advanced Processing of Metals and Materials – Thermo and Physicochemical principles: Non-ferrous High-temperature processing, Edited by F. Kongoli and R.G. Ready, TMS, San Diego, USA, 2006, s. 697-710.
71. Saternus M., Merder T., Warzecha P., Numerical modelling of the hydrogen removal process from liquid aluminium, International Conference Liquid Metal Processing and Casting, Edited by M. Krane, R. Williamson, J.P. Bellot and A. Jardy, SF2M, Nancy, Francja, 2011, s. 329-336.
72. Saternus M., The influence of the shape of impeller on hydrogen removal from liquid aluminium: physical model, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials Thermec 2011, Quebec City, Canada, 2011.
73. Saternus M., Botor J., Modelowanie procesów rafinacji aluminium i jego stopów, XV Konferencja Sprawozdawcza Polska metalurgia w latach 2006-2010, Krynica, Komitet Metalurgii Polskiej Akademii Nauk, 2010, s. 166-173.
74. Merder T., Saternus M., Warzecha P., Possibilities of 3D model application in the process of aluminium refining in the unit with rotary impeller, Archives of Metallurgy and Materials, 59 (2), 2014, s. 789-794.
75. Saternus M., Merder T., Influence of processing parameters on the gas dispersion level in the process of argon blowing through aluminium, Acta Metallurgica Slovaca, Conference, 4, 2014, s. 181-188.
76. Saternus M., Pieprzyca J., Merder T., Physical modeling of chosen metallurgical processes, Thermec`2016, Materials Science Forum, s. 1685-1690.
77. Saternus M., Merder T., Physical modeling of aluminium refining process conducted in batch reactor with rotary impeller, Metals, 726 (8), 2018, s. 1-14.
78. Saternus M., Determination of RTD curves for aluminium refining process conducted in batch reactor – physical modelling, Archives of Metallurgy and Materials, 63 (4), 2018, s. 1909-1914.

## List of figures

Fig. 2.1. View of the physical model of a shaft furnace.

Fig. 2.2. General view of the measuring system.

Fig. 2.3. View of the third generation installation.

Fig. 2.4. Research stand for determining solidification kinetics of traditional steel ingots.

- Fig. 2.5. View of the mould model, immersion nozzles and kinetics diagram of modelling flow.
- Fig. 2.6. A) View of the oxygen converter water model, B) ladle model.
- Fig. 2.7. View of the first comprehensive model of a CC device.
- Fig. 2.8. View of the second comprehensive model of a CC device.
- Fig. 2.9. Part of the Laboratory of Modelling Research for smelting and refining of steel.
- Fig. 2.10. Part of the Laboratory of Modelling Research of the continuous steel casting process.
- Fig. 2.11. View of elements of the test stand for modelling the aluminium barbotage process.
- Fig. 2.12. Criterion specifying the moment of blocking two-phase flow (gas + dust) through a batch deposit.
- Fig. 2.13. The impact of bed movement on the amount of dust retained in the deposit and resistance to gas flow.
- Fig. 2.14. The influence of the type and size of bed pieces on the total mass of dust retained in the deposit and resistance of gas flow as a function of gas velocity.
- Fig. 2.15. Values of radial static pressure distribution ( $U_g = 0.4$  m/s).
- Fig. 2.16. Parameter defining the moment of suspension of the bed during a two-phase (gas + dust) flow through a mobile lump deposit.
- Fig. 2.17. Radial distribution of indicators ( $\epsilon_p$ ), ( $\epsilon_{ps}$ ), ( $\epsilon_{pd}$ ), (level: 0-100 mm).
- Fig. 2.18. Comparison of experimentally measured values of the "static" dust volume index.
- Fig. 2.19. View of the hydraulic physical model of the CC device.
- Fig. 2.20. Results of flow visualization tests A) in the tundish model, B) CFD results.
- Fig. 2.21. Exemplary results of model visualization tests for a three-strand tundish.
- Fig. 2.22. Examples of CFD test results for a three-strand tundish.
- Fig. 2.23. A) RTD curves for steel in tundish type F, B) range of transition zone.
- Fig. 2.24. A) View of the model test stand concerning phenomena occurring in the CC device molds, B) Sample results of laboratory tests.
- Fig. 2.25. Analyzed internal equipment of tundish working space.
- Fig. 2.26. Exemplary results of conducted CFD calculations and laboratory experiments.
- Fig. 2.27. A) RTD curves type F for analyzed USP variants, B) CFD results comparison with experimental results on a water model.
- Fig. 2.28. CFD analysis of NMI distribution and separation in a two-strand tundish
- Fig. 2.29. A) Scheme of installation and devices of the RH model, B) view of the model.
- Fig. 2.30. Exemplary results of visualization of RH process.
- Fig. 2.31. Test results for two variants of purging plugs fittings – PK model.
- Fig. 2.32. Numerical modelling of hydrodynamic phenomena occurring during the purging of steel with inert gases.
- Fig. 2.33. Scheme of the model of a continuous steel casting machine.
- Fig. 2.34. A view of the model of a continuous steel casting machine.
- Fig. 2.35. A) Changes in the concentration of a dimensionless marker, B) The dependence of the mixing time on the intensity of the gas introduced (for a 95% degree of homogenization).
- Fig. 2.36. Test results for molds 130x130 and 160x160.
- Fig. 2.37. A) Changes in marker concentration, B) Summary of individual flows shares.

- Fig. 2.38. Creation of gas bubbles in dependence on plug types A) physical modelling, B) CFD simulation.
- Fig. 2.39. A) Model scheme, B) model view.
- Fig. 2.40. Comparison of the results of numerical simulations with experimental data.
- Fig. 2.41. Mechanism of gas bubble cone (gas column) formation and their degree of dispersion in a model liquid for selected test variants.
- Fig. 2.42. Velocity contour maps with selected power lines for selected time moments for the selected variant of the experiment – the gas introduced by a single plug.
- Fig. 2.43. A) Measurement scheme for microparticles distribution testing, B) Measurement scheme using a laser microparticle counter.
- Fig. 2.44. Determined concentrations of microparticles for fractions (20  $\mu\text{m}$ ) at measuring points.
- Fig. 2.45. Movement of the microparticles fraction 50  $\mu\text{m}$  (a summary of results from water model with CFD calculations).
- Fig. 2.46. A) View of URC-7000 reactor model, B) scheme of model with dimensions in mm.
- Fig. 2.47. Exemplary results of visualisation research of dispersion level for two porous plugs for the URC-7000 reactor for flow rate of refining gas: A) 2  $\text{dm}^3/\text{min}$  B) 5  $\text{dm}^3/\text{min}$ , C) 15  $\text{dm}^3/\text{min}$ , D) 25  $\text{dm}^3/\text{min}$ .
- Fig. 2.48. Exemplary results of visualisation research for URC-7000 reactor: A) enlargement of porous plug for flow rate of refining gas 15  $\text{dm}^3/\text{min}$ , B) enlargement of porous plugs for flow rate of refining gas 30  $\text{dm}^3/\text{min}$ , C) surface of the liquid – side view for flow rate of refining gas 15  $\text{dm}^3/\text{min}$ , D) surface of the liquid – upper view for flow rate of refining gas 15  $\text{dm}^3/\text{min}$ .
- Fig. 2.49. Exemplary results of oxygen removal from water as an analogy of hydrogen removal from aluminium for URC-7000 reactor for the flow rate of refining gas: A) 2  $\text{dm}^3/\text{min}$  B) 8  $\text{dm}^3/\text{min}$ .
- Fig. 2.50. Exemplary results of visualization research of dispersion level for the URC-7000 reactor for the flow rate of refining gas 15  $\text{dm}^3/\text{min}$  with using glycerin as a modelling medium: A) pure glycerin, B) 60% glycerin solution.
- Fig. 2.51. Exemplary results of numerical simulations conducted for URC-7000 reactor for the flow rate of refining gas 20  $\text{dm}^3/\text{min}$ .
- Fig. 2.52. A) View of URO-200 reactor model, B) scheme of model with dimensions in mm.
- Fig. 2.53. Exemplary results of visualisation research of dispersion level for URO-200 reactor for the flow rate of refining gas 10  $\text{dm}^3/\text{min}$  and rotary impeller speed 350 rpm.
- Fig. 2.54. Exemplary results of generated gas bubbles obtained in the range of visualisation research of dispersion level for URO-200 reactor for impeller: A) no 2, B) no 3.
- Fig. 2.55. Exemplary results of oxygen removal from water as an analogy of hydrogen removal from aluminum for URO-200 reactor: A) 300 rpm, B) 500 rpm
- Fig. 2.56. Exemplary results of numerical simulations conducted for URO-200 reactor for the flow rate of refining gas 15  $\text{dm}^3/\text{min}$  and rotary impeller speed 350 rpm.
- Fig. 2.57. Exemplary RTD curves determined for URO-200 reactor.
- Fig. 2.58. Exemplary results of visualisation research of mixing the tracer in the whole volume of URO-200 reactor.



Albert SMALCERZ<sup>1</sup>, Bartosz WĘCKI<sup>2</sup>

### **Rozdział 3**

## **WIELKOŚĆ POWIERZCHNI WYMIANY MASY W PROCESIE RAFINACJI METALI TECHNOLOGIAMI VIM I ISM**

### **3.1 Wstęp**

Urządzenia indukcyjne możemy podzielić na dwie podstawowe grupy: nagrzewnice i piece. W procesach rafinacji metali wykorzystywane są piece indukcyjne. Pierwszy piec tego typu został zbudowany w 1887 r. przez S. Ferrantiego. Idea jego działania polegała na wykorzystaniu uzwojenia wtórnego jako wsadu poddawanego topieniu. To rozwiązanie zostało udoskonalane między innymi przez A. Colby'ego w 1890 r. oraz F. Kjellina w 1900 r. Tego ostatniego uznaje się za twórcę pierwszego na świecie pieca indukcyjnego nazywanego od jego nazwiska - piecem Kjellina. Przez kolejne kilkadziesiąt lat następował rozwój konstrukcji pieców indukcyjnych średniej częstotliwości [1 – 2]. Największy jednak rozwój techniki nagrzewania indukcyjnego w procesach topienia przypada po II wojnie światowej [3].

Podstawowy podział pieców indukcyjnych wynika przede wszystkim z ich konstrukcji. Stąd możemy wyróżnić trzy rodzaje pieców indukcyjnych:

- kanałowy,
- tyglowy (VIM – ang. Vacuum Induction Melting – PIT),
- z „zimnym” tygłem (VIM-ISM – ang. Induction Skull Melting – PZT).

Na przykładzie pieców tyglowych (klasycznego i z „zimnym” tygłem) opisano mechanizm nagrzewania, a następnie topienia w nich wsadu metalicznego. W rozdziale monografii dokonano przeglądu tych dwóch technologii topienia indukcyjnego. Te dwa rodzaje pieców są wykorzystywane w procesie rafinacji metali [4].

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Katedra Informatyki Przemysłowej

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Katedra Metalurgii i Recyklingu

## 3.2 Topienie indukcyjne stosowane w procesach rafinacji metali

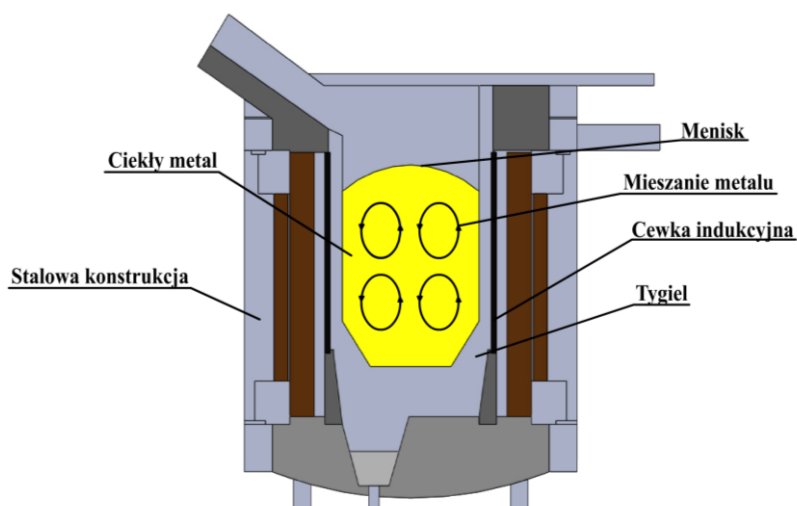
### 3.2.1 Piec indukcyjny tyglowy (PIT)

Podstawowym urządzeniem wykorzystywanym do topienia metali i ich stopów jest indukcyjny piec tyglowy (PIT). Źródłem pola elektromagnetycznego jest cylindryczny wzbudnik, wykonany z przewodnika miedzianego (rurka chłodzona wodą). Wewnątrz wzbudnika znajduje się tygiel, najczęściej nieprzewodzący (ceramiczny) lub przewodzący (grafitowy lub stalowy). W pierwszym przypadku nagrzewanie wsadu ma charakter bezpośredni, a w drugim pośredni – prądy wirowe indukują się w tyglu, a ciepło jest przekazywane do wsadu głównie na drodze przewodzenia. Część strumienia magnetycznego generowanego przez prąd wzbudnika przenika do wsadu, a część występuje pomiędzy wsadem a wzbudnikiem. Stąd dodatkowo rozkład pola elektromagnetycznego występującego na zewnątrz pieca, jest kształtowany przez rdzenie magnetyczne (rys. 3.1). Zewnętrzne rdzenie tworzą obwód magnetyczny, zamykający strumień wewnątrz komory pieca.

Topienie indukcyjne jest stosowane od wielu dekad [5 – 12] do topienia tak stali jak i stopów metali nieżelaznych oraz wsadów niemetalicznych tj. szkła, tlenków, materiałów ceramicznych czy też półprzewodnikowych. Piece indukcyjne najczęściej jednak stosuje się do topienia metali, przetrzymywania ich w stanie płynnym i ich dozowania, a także do korygowania składu chemicznego przed odlewaniem. Charakterystyczną cechą topienia jest mieszanie stopionych metali. Wynika to przede wszystkim z działania sił elektrodynamicznych:

- ściskających (zjawisko dośrodkowe), występujących na skutek wzajemnego oddziaływania prądów wirowych w stopionym metalu,
- odpychających (zjawisko odśrodkowe), wytworzonych przez wzajemne oddziaływanie prądów wzbudnika i wsadu.

W PIT wytwarzanie ciepła odbywa się najczęściej w samym wsadzie. Dostarczenie mocy z cewki do wsadu zazwyczaj następuje bez ich styku. Źródłem mocy generowanej we wsadzie pieca indukcyjnego jest prąd zmienny przepływający przez wzbudnik. Zadaniem wzbudnika jest wytwarzanie i kształtowanie pola elektromagnetycznego. Cechą charakterystyczną PIT jest to, iż wsad znajduje się jedynie wewnątrz wzbudnika. Pod wpływem pola elektromagnetycznego w przewodzącym wsadzie indukują się prądy wirowe. Indukowane prądy zgodnie z prawem Joule'a, wytwarzają ciepło, które dla określonej mocy i w określonym czasie przekształca wsad w postać ciekłą.



Rys. 3.1. Indukcyjny piec tyglowy [1]

Prądy wirowe indukowane we wsadzie oprócz tego, że są źródłem ciepła Joule'a, powodują powstawanie w metalu sił elektromagnetycznych (siły Lorentza). Jest to wynikiem interakcji indukowanych prądów wirowych z powstałym polem elektromagnetycznym.

Te siły są odpowiedzialne za dwie ważne cechy topienia indukcyjnego:

- zmiany powierzchni swobodnej metalu,
- mieszania się metalu zaznaczonego na rys. 3.1.

Zwiększenie powierzchni swobodnej ciekłego metalu w trakcie przetopu w piecach indukcyjnych może znacznie wpływać na efektywność procesu jego rafinacji np. usunięcia gazów w nim rozpuszczonych. Mieszanie metalu w procesie wytapiania indukcyjnego może prowadzić do intensywnego transportu ciepła i masy, co prowadzi do pożądanej równomierności temperatury i składu chemicznego całego stopu.

Jednym z podstawowych parametrów wsadu nagrzewanego (topionego) indukcyjnie, który decyduje o wskaźnikach techniczno-ekonomicznych procesu, jest głębokość wnikania pola elektromagnetycznego  $\delta$  (GWPE) do wsadu określona zależnością [13-14]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\gamma}{\omega\mu}} \quad (3.1)$$

gdzie:

- $\omega$  – pulsacja ( $2\pi f$ ),  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- $f$  – częstotliwość, Hz,
- $\mu$  - przenikalność magnetyczna,  $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ ,
- $\gamma$  – rezystywność,  $\Omega\cdot\text{m}$ .

W tab. 3.1 przedstawiono GWPE aluminium dla różnych częstotliwości prądu zasilającego.

Tabela 3.1.

Głębokość wnikania pola elektromagnetycznego dla aluminium [1]

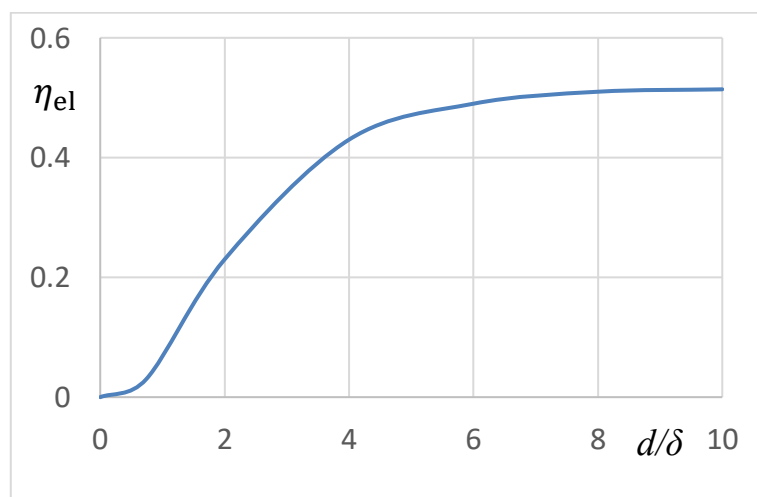
	$\delta, 10^{-3} \text{ m}$								
$f, \text{ kHz}$	0,05	0,15	0,5	1	2,5	8	10	100	1000
$T=293 \text{ K}, \mu_r=1$ $\sigma=34 \cdot 10^6 \text{ S/m}$	12,2	7	3,9	2,7	1,7	0,96	0,86	0,27	0,086
$T=933 \text{ K}, \mu_r=1$ $\sigma=5,1 \cdot 10^6 \text{ S/m}$	31,5	18,2	10	7	4,5	2,5	2,2	0,7	0,22

Jak wynika z danych przedstawionych w tab. 3.1, dla PIT GWPE jest bardzo mała w stosunku do rozmiaru pieca. Dodatkowo w trakcie topienia wartość GWPE jest mniejsza dla początkowej fazy nagrzewania. W celu uzyskania względnie wysokiej sprawności elektrycznej, częstotliwość roboczą dobiera się w taki sposób, aby stosunek średnicy tygła  $d$  do głębokości wnikania  $\delta$  był większy niż 6. Na rys. 3.2. przedstawiono zależność sprawności elektrycznej tyglowych pieców indukcyjnych w funkcji  $d/\delta$ , dla aluminium. Sprawność elektryczna pieca jest określona zależnością [1]:

$$\eta_{el} = \frac{P_{ws}}{P_c} \quad (2)$$

gdzie:

- $P_{ws}$  – moc wydzielona we wsadzie, W
- $P_c$  – moc całkowita, W



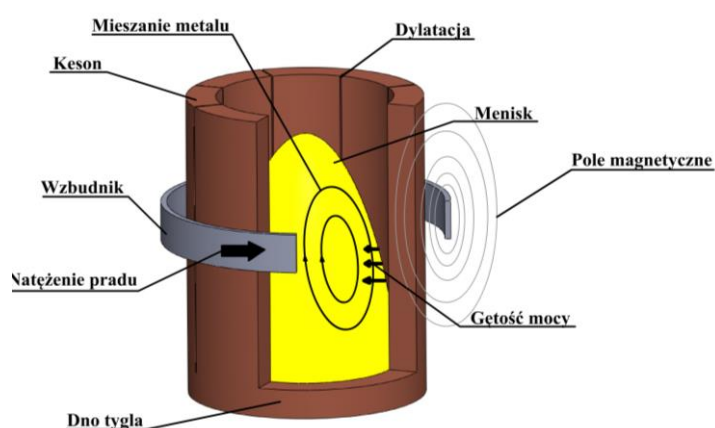
Rys. 3.2. Zależność sprawności elektrycznej PIT od stosunku średnicy wsadu do GWPE dla aluminium [2]

Maksymalne sprawności elektryczne dla aluminium są znacznie niższe niż dla ferromagnetyków i mieszczą się w zakresie od 50% do 70% [15 – 16].

### 3.2.2 Piec indukcyjny z „zimnym” tygłem (PZT)

Nagrzewanie indukcyjne tyglowe klasyczne, omówione w rozdziale 3.2.1 pomimo szerokich zastosowań ma kilka wad. Jedną z nich jest to, że zastosowanie klasycznych tygli może m.in. powodować, zanieczyszczenie materiałem tygla topionego wsadu z powodu jego powinowactwa chemicznego. Odmienną technologią nagrzewania indukcyjnego likwidującą w pewnym zakresie tą wadę jest topienie w piecach indukcyjnych z „zimnym” tygłem (PZT).

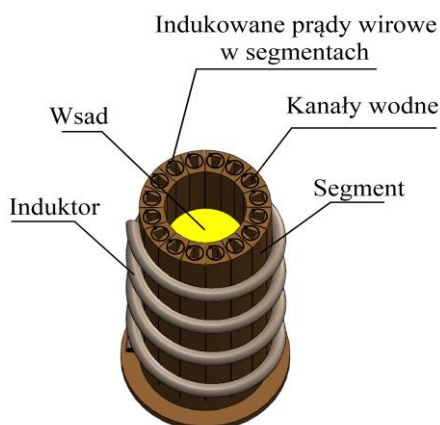
Metoda ta jest coraz częściej wykorzystywana w procesach przemysłowych. Konstrukcję pieca PZT przedstawiono w sposób poglądowy na rys. 3.3.



Rys. 3.3. Piec indukcyjny z „zimnym” tygłem (PZT) [2]

Podobnie jak dla PIT w PZT występują te same zjawiska w trakcie procesu topienia, które omówiono dokładniej w rozdziale 3.2.1. Oczywiście istnieje różnica w sposobie przekazywania energii do wsadu, wynikająca z zastosowania tygla wykonanego z materiału przewodzącego [17 – 21]. Jest on najczęściej wykonany z miedzi, chłodzony cyrkulującą wodą i otoczony wzbudnikiem. W rzeczywistości tygiel przewodzący prąd elektryczny, stanowi osłonę elektromagnetyczną, która przeciwstawia się przekazywaniu energii ze wzbudnika do wsadu. Rozwiązaniem pozwalającym wyeliminować to zjawisko jest podzielenie ściany tygla na oddzielne sektory w taki sposób, aby droga dla przepływu prądów wirowych indukowanych w nim była mała, co powoduje zmniejszenie gęstości prądów na zewnętrznej powierzchni tygla (rys. 3.4). Na wewnętrznej ścianie tygla indukują się prądy wirowe,

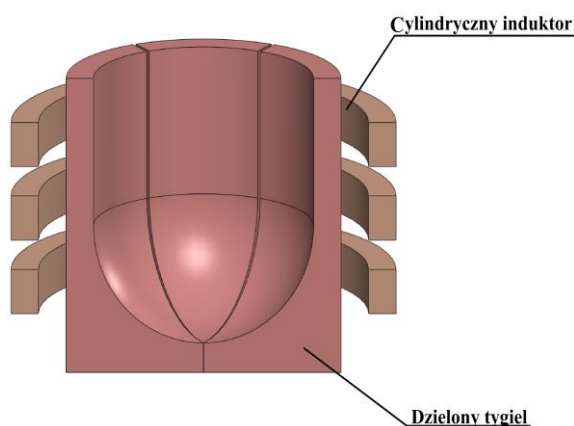
które są źródłem pola elektromagnetycznego i umożliwiają wydzielanie się mocy we wsadzie. Cały układ, składający się ze wzbudnika i tygla sekcjonowanego, działa jak transformator elektryczny, którego pierwotnym elementem są cewki wzbudnika, a wtórnym dzielony tygiel [22–24].



Rys. 3.4. Uproszczony schemat PZT [25]

Kształt „zimnego” tygla jest podobny do tygla wykonanego z materiału ogniotrwałego (ceramicznego). W praktyce tygiel może być wykonany na kilka sposobów, a najczęściej spotykane rozwiązania to:

- tygle okrągłe lub cylindryczne o pionowych ściankach z litym dnem metalicznym chłodzonym wodą zamykającym podstawę tygla,
- tygle okrągłe lub cylindryczne, przy czym pionowa ściana jest zbieżna z osią znajdującą się w dolnej części, tworząc dno tygla (rys. 3.5).



Rys. 3.5. Przekrój PZT [25]

W tyglu, w którym dno jest masywne (jednolite), pole elektromagnetyczne wytwarzane jest przede wszystkim przez ścianę pionową. Siły odpychające, indukowane w materiale przez pole elektromagnetyczne, umożliwiają całkowite wyeliminowanie kontaktu ze ścianą tygla. Stopiony materiał pozostaje tylko na schłodzonym dnie, gdzie następuje tworzenie się cienkiej warstwy zakrzepniętej (tzw. skulla), powstałej na granicy ciekłego metalu i „zimnego” tygla. Biorąc pod uwagę intensywność mieszania materiału, wymiana ciepła z dnem jest bardzo duża, ogranicza to tym samym możliwość przegrzania materiału. W tyglu dzielonym w całości występuje wzrost natężenia pola magnetycznego od góry do dołu tygla. Taki sam rozkład mają siły elektromagnetyczne indukowane we wsadzie, co powoduje lewitacje.

Wadą pieców indukcyjnych z zimnym tygłem, w porównaniu piecami indukcyjnymi tyglowymi, jest niska sprawność spowodowana stratami mocy wydzielanej w „zimnym” tyglu (efekt Joule'a). Istnieje możliwość zwiększenia sprawności poprzez zastosowanie niskiej częstotliwości (50 Hz) i sektorowej ścianki wykonanej z cienkiej miedzi (kilka milimetrów). Poszczególne sektory są chłodzone przez pojedynczy układ. Tygiel staje się wtedy częściowo „przezroczysty” dla pola elektromagnetycznego, co zwiększa jego sprawność elektryczną. Jednak dla niskiej częstotliwości, tygiel musiałby mieć duże rozmiary. Wynika to, podobnie jak dla PIT, z optymalnego wykorzystania cewek wzbudnika, dla których należy zapewnić odpowiedni stosunek między średnicą tygla, a głębokością wnikania pola  $d/\delta$  [25].

W celu poprawy lewitacji, stosuje się rozwiązanie [26 – 28], w którym oprócz indukowanego przez wzbudnik pola elektromagnetycznego, występuje pole magnetyczne, którego źródłem jest umieszczony dodatkowo w piecu magnes. Statyczne pole magnetyczne generuje siłę pionową, która poprawia lewitację materiału. Są podjęto również badania nad wykorzystaniem dwóch źródeł zasilania o różnych częstotliwościach i dwóch zestawów cewek wzbudnika [24]. Dolna cewka jest zasilana ze źródła o małej mocy i średniej częstotliwości (np. 3 kHz), która ma zapewnić stabilność bez powodowania silnego nagrzewania. Górna cewka, prawie nie ingeruje w lewitację, jest zasilana ze źródła o wyższej mocy i wyższej częstotliwości (np. 30 kHz).

### 3.3 Badanie procesu rafinacji aluminium w piecach indukcyjnych

#### 3.3.1 Materiały i aparatura badawcza

Badaniom poddano dwa różne stopy aluminium tj.:

- stop Al-Zn4,5Mg1,
- stop Al-Zn5,5MgCu,

Stopy dobrano w taki sposób, aby występujące w nich składniki charakteryzowały się znaczną różnicą w równowagowych prężności par w stosunku do metalu osnowy. Skład chemiczny stopów użytych w badaniach zestawiono w tab. 3.2.

Tabela 3.2.

Składy chemiczne stopów aluminium

		Składniki stopu, %mas.										
Symbol stopu	Oznaczenie	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Cr	Ti	Zr	Inne	Al
Al-Zn4,5Mg1	AlZn4,2	4,2	1,2	<0,2	0,28	<0,4	<0,35	0,23	<0,05	0,014	Zr + Ti:0,16	reszta
Al-Zn5,5MgCu	AlZn6,3	6,3	2,5	1,6	<0,3	<0,5	<0,4	0,23	<0,2	-	Zr + Ti:<0,25	reszta

Badania zrealizowano z wykorzystaniem dwóch indukcyjnych pieców próżniowych firmy Seco-Warwick tj. próżniowego indukcyjnego pieca tyglowego PIT (z tygłem ceramicznym) oraz indukcyjnego pieca PZT. Widoki ogólne obu stanowisk badawczych przedstawiono na rys. 3.6 i 3.8.

PIT typu VIM 20-50 był wyposażony w następujące elementy:

- panel operatorski umożliwiający kontrolę parametrów roboczych i sterowanie procesami zachodzącymi w piecu,
- napęd przechyłu wzbudnika,
- układ umożliwiający wprowadzanie dodatków stopowych bez naruszania atmosfery ochronnej,
- układ umożliwiający podgrzewanie wlewnicy,
- mechanizm poboru próbek.

Na stanowisku badawczym był realizowany pomiar temperatury w sposób kontaktowy z wykorzystaniem czujnika termoelektrycznego oraz bezkontaktowy z wykorzystaniem pirometru. Podstawowe parametry eksploatacyjne PIT zestawiono w tab. 3.3. Schemat omawianego urządzenia przedstawiono natomiast na rys. 3.7.





Rys. 3.6. Widok ogólny stanowiska doświadczalnego PIT

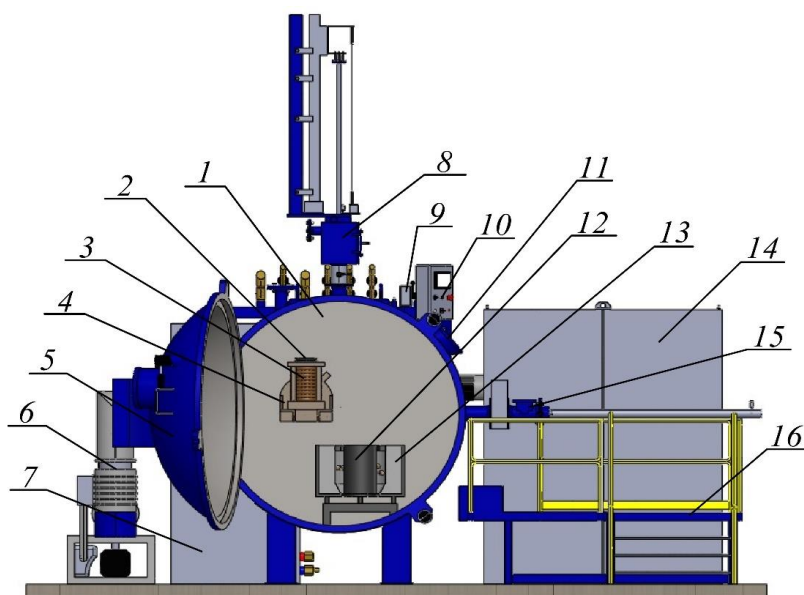
Tabela 3.3.

## Parametry eksploatacyjne PIT

Moc maksymalna	75 kW
Maksymalna próżnia	0,01 Pa
Układ próżniowy	Pompa mechaniczna, pompa Rootsa, pompa dyfuzyjna
Maksymalna temperatura pracy	2073 K
Objętość tygła	2,5 dm <sup>3</sup>
Maksymalna temperatura nagrzania wlewnicy	1273 K

PZT typu VIM ISM 2-200 był wyposażony w następujące elementy:

- układ elektrycznego przechyłu wzbudnika,
- stanowisko operatorskie umożliwiające podgląd procesu przez system kamer, sterowanie oraz kontrolę trwającego procesu,
- mechanizm wprowadzania dodatków stopowych, który umożliwił domieszkowanie kąpieli metalicznej bez naruszania atmosfery ochronnej,
- mechanizm poboru próbek,
- system podgrzewania wlewnicy,
- system odlewania odśrodkowego.



Rys. 3.7. Stanowisko badawcze PIT: 1 - komora próżniowa, 2 - tygiel, 3 - cewka indukcyjna chłodzona wodą, 4 - mechanizm przechyłu tygla, 5 - drzwi pieca, 6 - układ pomp próżniowych, 7 - generator, 8 - układ poboru próbek i pomiaru temperatury, 9 - sterowanie przechyłem tygla, 10 - panel operatorski, 11 - wziernik, 12 - wlewnica (forma), 13 - grzejnik formy, 14 - szafa sterująca, 15 - układ wprowadzania dodatków stopowych, 16 - podest operatorski

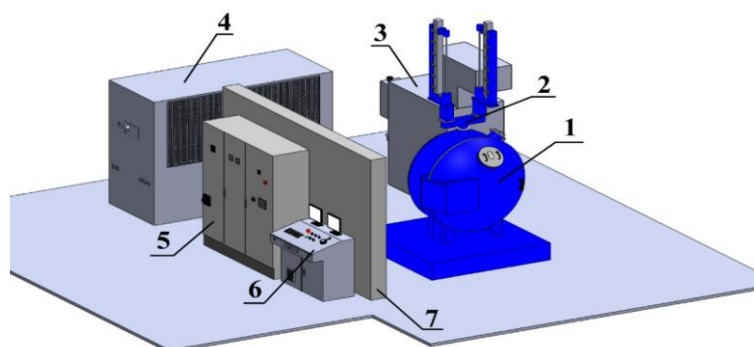


Rys. 3.8. Widok ogólny PZT

Również dla pieca PZT istniała możliwość dokonywania pomiaru temperatury w sposób kontaktowy z wykorzystaniem czujnika termoelektrycznego oraz bezkontaktowy z wykorzystaniem pirometru. Podstawowe parametry eksploatacyjne pieca zestawiono w tab. 3.4. Schemat omawianego urządzenia przedstawiono natomiast na rys. 3.9.

Parametry eksploatacyjne PZT

Moc maksymalna	200 kW
Maksymalna próżnia	0,001 Pa
Układ próżniowy	Pompa mechaniczna, pompa Rootsa, pompa dyfuzyjna
Maksymalna temperatura pracy	2073 K
Objętość tygla	$\approx 1 \text{ dm}^3$
Maksymalna temperatura nagrzania wlewnicy	1273 K



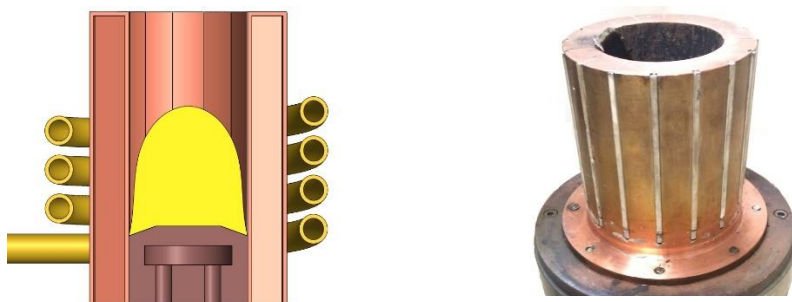
Rys. 3.9. Stanowisko badawcze PZT: 1 - komora próżniowa, 2 - śluza poboru próbek oraz pomiaru temperatury, 3 - generator, 4 - układ chłodzący, 5 - szafa sterująca, 6 - panel operatorski, 7 - ściana przeciwybuchowa

### 3.3.2 Metodyka eksperymentu

Próbka badanego stopu o odpowiedniej masie umieszczana była w tyglu. W zależności od typu pieca był to tygiel Isopress 1126-MG95I produkcji Capital Refractories wykonany z MgO lub zimny tygiel chłodzony wodą wykonany z miedzi. Na rys. 3.10 i 3.11 pokazano oba tygle wykorzystane w badaniach.

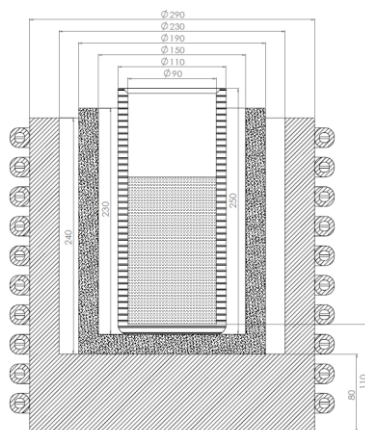


Rys. 3.10. Tygiel ceramiczny wykorzystany w PIT

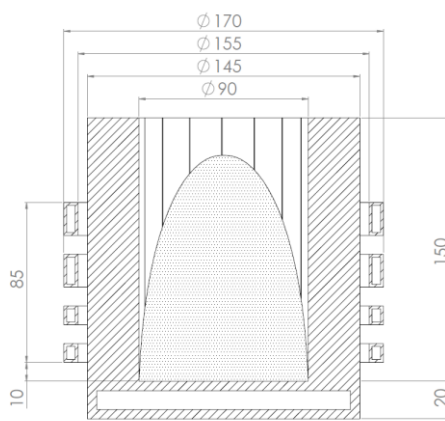


Rys. 3.11. Tygiel miedziany wykorzystany w PZT

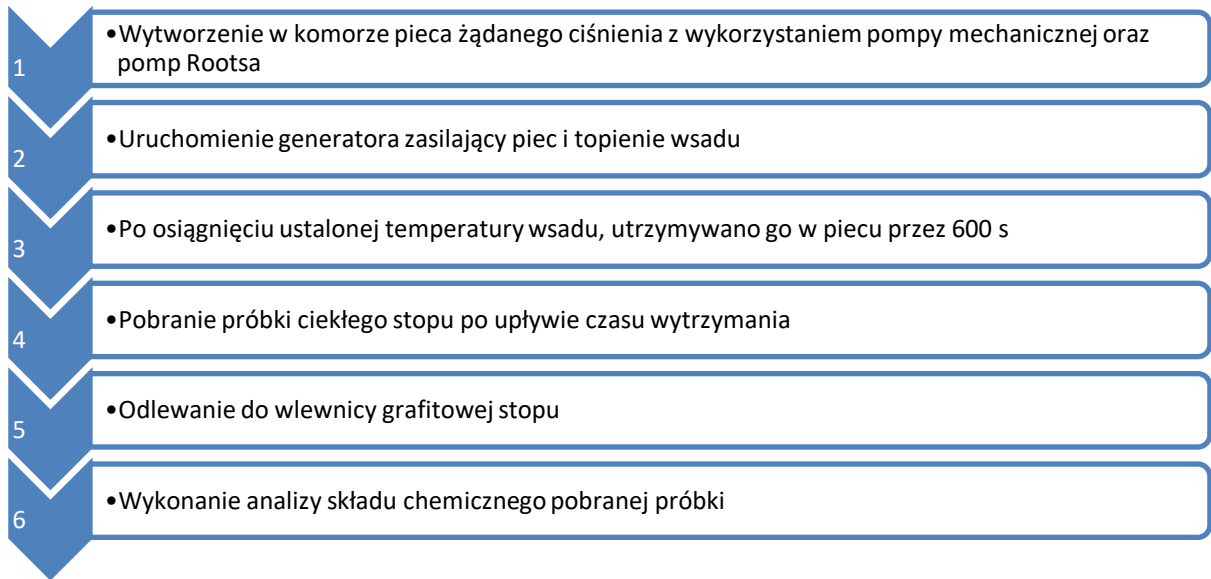
Na kolejnych rys. 3.12 i 3.13 przedstawiono wymiary geometryczne wsadu i tygla oraz ich położenie względem siebie. Realizacja eksperymentu odbywała się według następującego schematu (rys. 3.14).



Rys. 3.12. Położenie oraz wymiary elementów PIT



Rys. 3.13. Położenie oraz wymiary elementów PZT

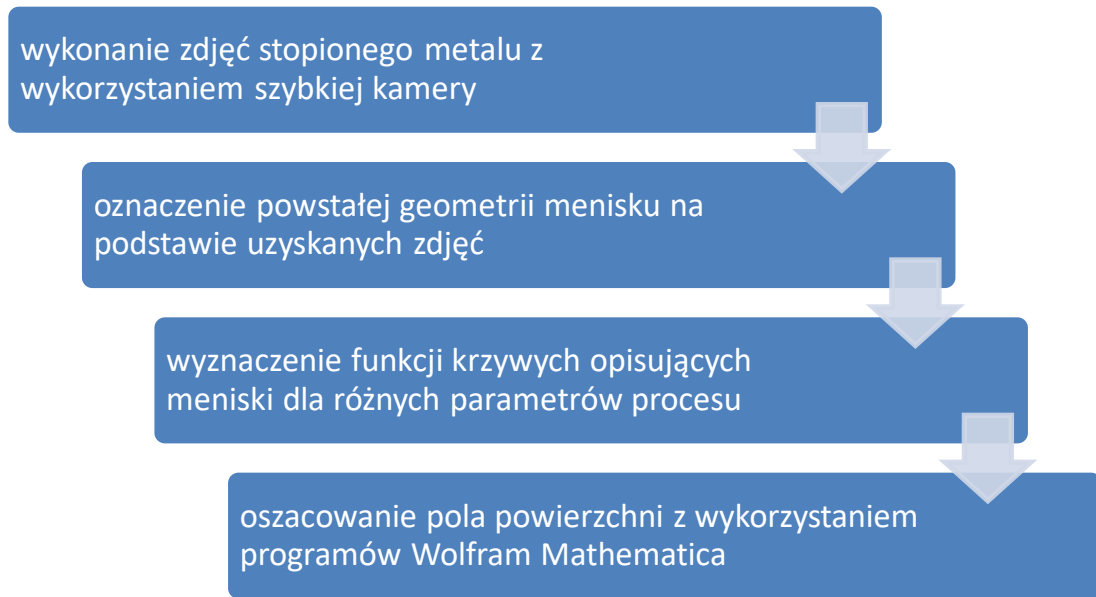


Rys. 3.14. Schemat realizacji eksperymentu

Pomiar temperatury odbywał się z wykorzystaniem czujnika termoelektrycznego typu B-PtRh30-PtRh6 oraz pirometru optycznego. Analizę składu chemicznego wykonywano pięciokrotnie dla każdej pobranej próbki. Wyniki przedstawione w dalszej części rozdziału są średnią z pięciu wartości. Do analizy składu chemicznego wykorzystano metodę absorpcyjnej spektrometrii atomowej, do pomiarów wykorzystano urządzenie firmy ASA Solar.

### 3.3.3 Metodyka pomiaru pola powierzchni ciekłego metalu

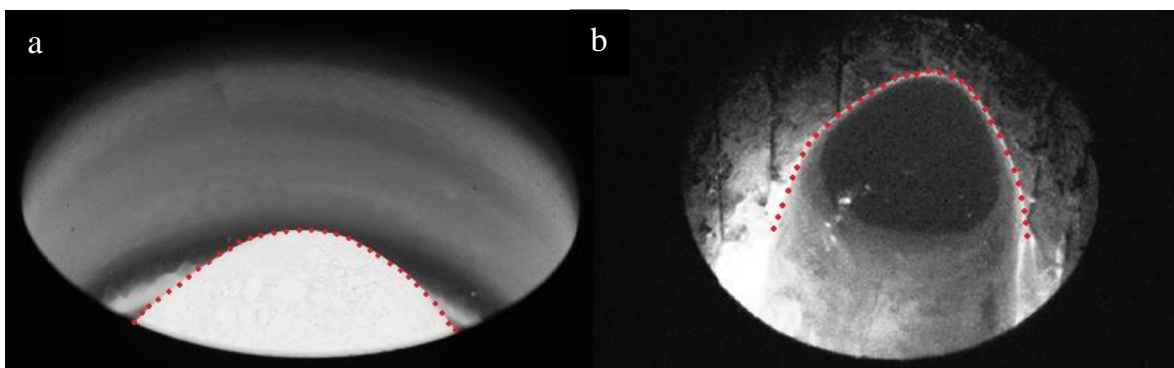
Zaproponowana w pracy metoda wyznaczania pola powierzchni międzyfazowej ciekły stop-faza gazowa składała się z czterech etapów przedstawionych na diagramie (rys. 3.15).



Rys. 3.15. Schemat wyznaczania pola powierzchni menisku

W pierwszym kroku korzystając z kamery Phantom v5.1 oraz kamery termowizyjnej FLIR wykonano serię zdjęć ciekłego metalu w trakcie realizacji procesu dla założonych parametrów roboczych pieca. Dla pieca PIT, wykonano serię zdjęć powierzchni stopionego metalu dla następujących mocy roboczych pieca 8, 12, 17 i 22 kW. Dla pieca PZT, analizowano powierzchnię menisku stopów aluminium o mocach pieca 70, 100 i 130 kW.

Na rys. 3.16 przedstawiono przykładowy wygląd menisku powstałego podczas topienia stopu w PIT i PZT.

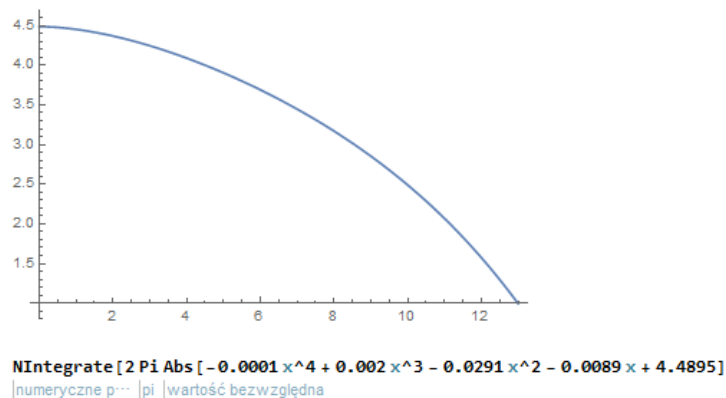


Rys. 3.16. Kształt menisku uzyskany w PIT (a) i PZT (b)

Do oszacowania wielkości menisku opracowano autorską metodę wykorzystującą oznaczenie powstałych powierzchni swobodnych. Zadanie to wykonano za pomocą programu WebPlotDigitizer 4.1. Wykorzystane narzędzie pozwala umieścić na zdjęciach punkty opisujące powstałą geometrię. Na tej podstawie wyznaczono linię

oraz funkcję opisującą kształt powstałej powierzchni międzyfazowej. Na rys. 3.16 zaprezentowano przykładowe zdjęcia menisku z naniesionymi punktami charakterystycznymi.

Znając funkcję opisującą kształt powierzchni swobodnej, w kolejnym kroku przeprowadzono szacowanie pola powierzchni menisku. W tym celu korzystano z programów Wolfram Mathematica. Pozwolił on na wyznaczenie pola powierzchni powstałej figury, poprzez obrót krzywej wokół osi rzędnej. Na rys. 3.17 zaprezentowano przykładowy zrzut ekranu z programu Wolfram Mathematica. Powstała geometria odwzorowuje kształt menisku stopu aluminium, uzyskanego w PZT.



Rys. 3.17. Zrzut ekranu z programu Wolfram Mathematica

Omówiona metoda szacowania została wykorzystana do szacowania pola powierzchni menisków dla wszystkich przeprowadzonych eksperymentów. Innym sposobem szacowania wielkości i kształtu menisku jest zastosowanie modelowania numerycznego. Umożliwia ono wyznaczenie z wystarczającą dokładnością kształtu oraz wysokości menisku bez potrzeby korzystania z kosztownych badań laboratoryjnych. Obliczenia numeryczne wymagają jednak zastosowania oprogramowania, najczęściej 3D, które powinno uwzględniać pola elektromagnetyczne, temperaturowe oraz przepływu. Takie obliczenia dla obu analizowanych pieców zostały przeprowadzone i omówione w [29 – 30] dla PIT oraz w [31 – 32] dla PZT.

Do zasymulowania procesu rafinacji konieczne jest opracowanie modeli uwzględniających sprzężenie między występującymi polami. W tym celu wykorzystuje się programy komercyjne np. Ansys Fluent, Ansys Mechanical, GetDP, Flux oraz dodatkowe programy stworzone przez użytkownika. Przykładowe procedury modelowania numerycznego procesu rafinacji metali opisano w [29 – 31].

Wysokości menisku aluminium uzyskanego eksperymentalnie oraz przy wykorzystaniu symulacji numerycznych w czasie topienia metalu w PZT wyniosły odpowiednio 13,5 cm oraz 11 cm [31]. Różnice na poziomie 10% potwierdzają przydatność wykorzystania modelowania numerycznego w celu określania pola powierzchni menisków powstałych w trakcie topienia metali.

Określenie wielkości pola powierzchni menisku jest niezbędne do wyznaczenia gęstości strumienia mas zanieczyszczeń badanych stopów.

### 3.4 Wyniki badań procesu rafinacji stopów aluminium

W tab. 3.5 i 3.6 zestawiono wyniki obliczonych gęstości strumieni mas cynku przedostającego się w wyniku przebiegu procesu z głębi fazy metalicznej do głębi fazy gazowej dla stopów Al4 i Al6 przy temperaturze 953K. Obliczeń gęstości strumienia dokonano na podstawie zależności:

$$N = \frac{\Delta m}{S \cdot t} \quad (3.3)$$

gdzie:

- $N$  – gęstość strumienia,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- $\Delta m$  – ubytek masy, g
- $S$  – pole powierzchni międzyfazowej,  $\text{cm}^2$
- $t$  – czas, s

Ubytek masy obliczono według zależności:

$$\Delta m = (m_p \cdot C_p) - (m_k \cdot C_k) \quad (3.4)$$

gdzie:

- $m_p$  – masa początkowa, g
- $m_k$  – masa końcowa, g
- $C_p$  – początkowe stężenie procentowe, %
- $C_k$  – końcowe stężenie procentowe, %

Jako oznaczenie eksperymentu przyjęto ciąg symboli i liczb oznaczających kolejno typ pieca, rodzaj stopu, moc pieca oraz ciśnienie w komorze pieca. Na rys. 3.18 zaprezentowano oznaczenia dla badanych wariantów eksperymentu. Oznaczenie eksperymentu składa się z ciągu 4 symboli A-B-C-D:



A - typ pieca	<ul style="list-style-type: none"> <li>•PIT</li> <li>•PZT</li> </ul>
B - rodzaj stopu	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Al6 - stop AlZn6,3</li> <li>•Al4 – stop AlZn4,2</li> </ul>
C - moc pieca	<ul style="list-style-type: none"> <li>•8, 12, 17, 22 – moc pieca PIT w kW</li> <li>•70, 100, 130 – moc pieca PZT w kW</li> </ul>
D - ciśnienie w komorze pieca	<ul style="list-style-type: none"> <li>•1000 – ciśnienie 1000 Pa</li> <li>•500 – ciśnienie 500 Pa</li> <li>•100 – ciśnienie 100 Pa</li> <li>•10 – ciśnienie 10 Pa</li> </ul>

Rys. 3.18. Sposób oznaczenia eksperymentów

Pierwszą wielkością rejestrowaną podczas badań topienia stopów aluminium było pole powierzchni menisku powstałego w trakcie realizacji procesu rafinacji próżniowej. Zestawienie wartości pól powierzchni uzyskanych dla obu pieców przedstawiono w tab. 3.5. Aby można było porównać wyniki uzyskane dla obu pieców, tak dobrano ich parametry elektryczne, aby moce wydzielane we wsadzie były podobne. W kolumnie drugiej przedstawiono moc wydzieloną we wsadzie. Badania przeprowadzono przy różnych ciśnieniach panujących w komorze obu pieców. Wpływ tego parametru na wielkość menisku jest niewielka. Stąd w dalszych badaniach przyjęto stałą wartość pola powierzchni dla różnych wartości ciśnienia.

Tabela 3.5.

Zestawienie wielkości menisków

Lp.	P <sub>w</sub> , kW	Typ pieca	Stop	S, cm <sup>2</sup>
1	7	PIT-12	Al6	92,4
	7	PZT-70	Al6	280,0
2	10	PIT-17	Al6	108,7
	10	PZT-100	Al6	311,8
3	13	PIT-22	Al6	155,0
	13	PZT-130	Al6	330,3

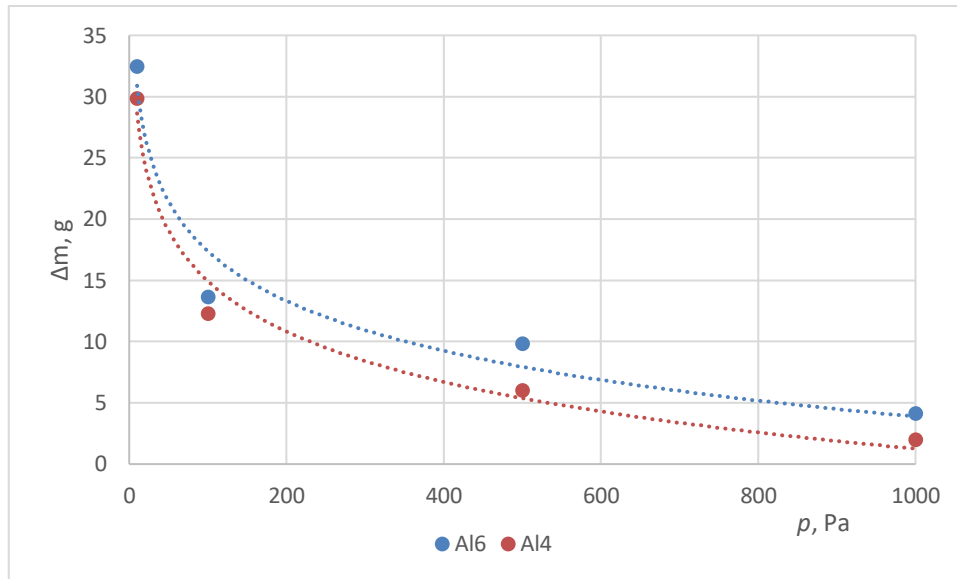
Na podstawie analizy wyników badań wykazano, że przy takich samych parametrach geometrycznych zastosowanych tygli, zbliżonych mocach wydzielonych we wsadzie

i zbliżonej masie badanych stopów, powierzchnia wymiany masy dla PZT była nawet 3-krotnie większa w stosunku do powierzchni oszacowanej dla PIT. Nie stwierdzono natomiast znaczącego wpływu ciśnienia roboczego stosowanego agregatu na wielkość powierzchni  $S$ . To spostrzeżenie dotyczy obu pieców.

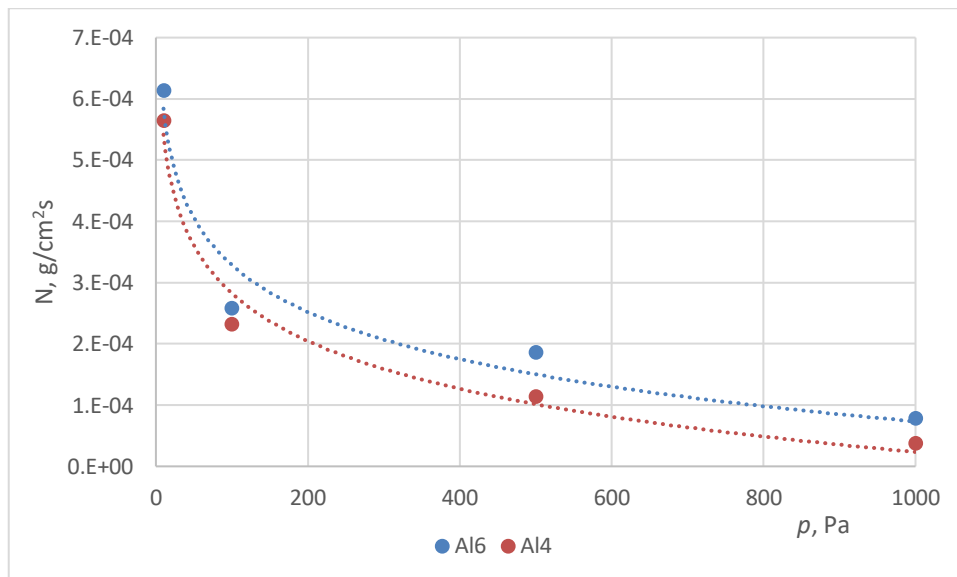
Ważnym parametrem determinującym proces rafinacji metali i wyznaczanym w trakcie eksperymentów jest ubytek masy składnika stopowego (w badanym stopie był to cynk). Na podstawie znajomości wielkości pola powierzchni oraz ubytku masy, zgodnie z zależnością (3) wyznaczana była gęstość strumienia. Topienie stopów aluminium w PIT przeprowadzono przy różnych ciśnieniach panujących w komorze pieca. Po przetrzymaniu stopu w temperaturze 953 K przez 10 min, pobrano próbki do badań. Wyniki ubytków masy cynku dla PIT i mocy wynoszącej 8 kW zestawiono w tab. 3.6 oraz przedstawiono na wykresach rys. 3.19 i 3.20.

Tabela 3.6.  
Zestawienie wartości gęstości strumienia i ubytków masy cynku w PIT

Lp.	Oznaczenie eksperymentu	T, K	$\Delta m$ , g	$N$ , g/cm <sup>2</sup> s
1	PIT -Al6-8-1000	953	4,14	$7,84 \cdot 10^{-05}$
2	PIT -Al6-8-500	953	9,84	$1,86 \cdot 10^{-04}$
3	PIT -Al6-8-100	953	13,63	$2,58 \cdot 10^{-04}$
4	PIT -Al6-8-10	953	32,48	$6,14 \cdot 10^{-04}$
5	PIT -Al4-8-1000	953	2,02	$3,82 \cdot 10^{-05}$
6	PIT -Al4-8-500	953	6,04	$1,14 \cdot 10^{-04}$
7	PIT -Al4-8-100	953	12,28	$2,32 \cdot 10^{-04}$
8	PIT -Al4-8-10	953	29,86	$5,65 \cdot 10^{-04}$



Rys. 3.19. Zależność ubytku masy cynku od ciśnienia panującego w komorze PIT



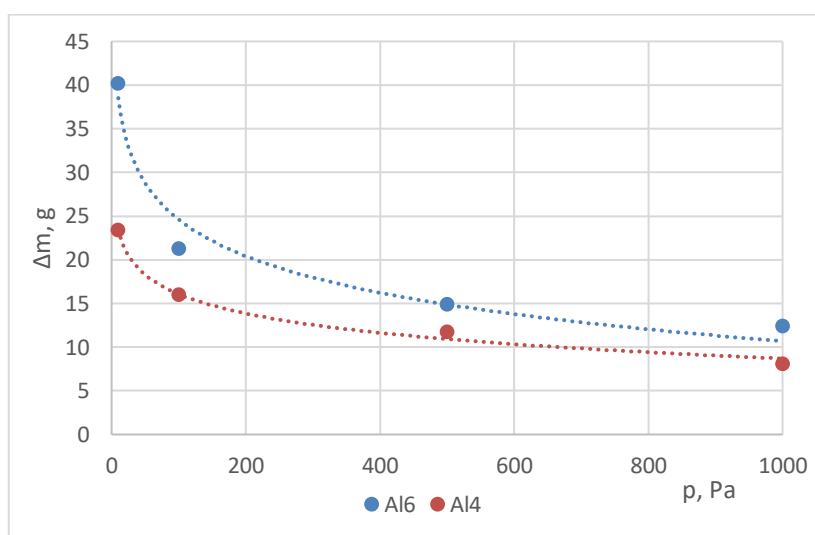
Rys. 3.20. Zależność gęstości strumienia masy odparowującego cynku od ciśnienia panującego w komorze PIT

Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że zmiana ciśnienia panującego w komorze pieca ma wpływ na szybkość rafinacji stopu aluminium. Wraz ze wzrostem tego ciśnienia maleje ubytek masy cynku oraz gęstość strumienia masy. Dla większej zawartości cynku w stopie proces rafinacji przebiega wyraźniej. Podobne eksperymenty przeprowadzono dla PZT. W tab. 3.7 oraz na rys. 3.21 i 3.22 zestawiono wyniki dla pieca o mocy 70 kW.

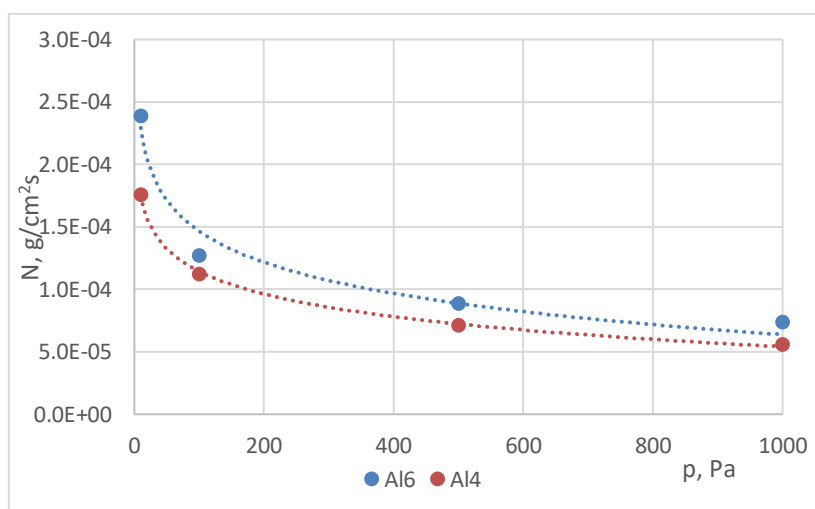
Tabela 3.7.

Zestawienie wartości gęstości strumienia i ubytków masy cynku w PZT

Lp.	Oznaczenie eksperymentu	T, K	$\Delta m$ , g	$N$ , g/cm <sup>2</sup> s
1	PZT-Al6-70-1000	953	12,37	$7,37 \cdot 10^{-05}$
2	PZT -Al6-70-500	953	14,87	$8,85 \cdot 10^{-05}$
3	PZT -Al6-70-100	953	21,27	$1,27 \cdot 10^{-04}$
4	PZT -Al6-70-10	953	40,19	$2,39 \cdot 10^{-04}$
5	PZT -Al4-70-1000	953	8,04	$5,60 \cdot 10^{-05}$
6	PZT -Al4-70-500	953	11,75	$7,14 \cdot 10^{-05}$
7	PZT -Al4-70-100	953	16,00	$1,12 \cdot 10^{-04}$
8	PZT -Al4-70-10	953	23,36	$1,76 \cdot 10^{-04}$



Rys. 3.21. Zależność ubytku masy cynku od ciśnienia panującego w komorze PZT



Rys. 3.22. Zależność gęstości strumienia odparowującego cynku od ciśnienia panującego w komorze PZT

Z analizy zebranych danych wynika, że wraz ze wzrostem mocy rośnie stopień usunięcia zanieczyszczenia z badanych stopów w trakcie ich przetopu w obu piecach.

Dla PIT i stopu o większej zawartości cynku następuje większy jego ubytek w trakcie przetopu. W zależności od ciśnienia i mocy pieca, a tym samym temperatury kąpieli ubytek masy dla stopu AlZn<sub>6,3</sub> jest ok. 1,5 razy większy niż dla stopu AlZn<sub>4,2</sub>. Wzrost ciśnienia w komorze pieca powoduje obniżenie ilości odpędzanego cynku. Charakterystycznym parametrem decydującym o szybkości rafinacji cynku jest moc pieca. Prowadzenie procesu rafinacji metali w piecach o większej mocy powoduje wzrost ubytku masy rafinowanego składnika.

Dla PZT podobnie jak w przypadku PIT stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia panującego w piecu maleje ilość usuwanego składnika. W zależności od ciśnienia i mocy pieca ubytek masy dla stopu AlZn<sub>6,3</sub> jest ok. 2 razy większy niż dla stopu AlZn<sub>4,2</sub>. Należy jednak podkreślić, że przypadku PZT wzrost mocy w analizowanym zakresie nie wpływa na temperaturę kąpieli. Wynika to z zastosowanego w tego typu agregatach chłodzonego tygla.

W tab. 3.8 zestawiono wartości ubytku masy ( $\Delta m$ ) dla urządzeń PIT i PZT przy jednakowym ciśnieniu roboczym panującym w komorze roboczej i podobnej mocy wydzielonej we wsadzie.

Tabela 3.8.

Zestawienie wartości gęstości strumienia i ubytków masy cynku w PIT PZT

Lp.	Oznaczenie eksperymentu	$P_w$ , kW	$\Delta m$ , g	$N$ , g/cm <sup>2</sup> s
1	PIT –Al6-17-1000	10	26,95	$4,13 \cdot 10^{-04}$
2	PZT –Al6-100-1000	10	26,16	$1,40 \cdot 10^{-04}$
3	PIT -Al4-12-100	7	14,68	$2,65 \cdot 10^{-04}$
4	PZT -Al4-70-100	7	16,00	$1,12 \cdot 10^{-04}$

Porównując wyniki uzyskane dla obu pieców można stwierdzić, że stopień usunięcia cynku jest na podobnym poziomie. Natomiast gęstość strumienia odparowującego cynku jest większa dla PIT. Wynika to z mniejszej wielkości powierzchni faza ciekła - faza gazowa.

Istotnym elementem realizacji procesu rafinacji metali jest zużycie energii. W tab. 3.9 zestawiono następujące parametry procesu:

- czasy topienia – czas mierzony od włączenia wzbudnika do momentu uzyskania ciekłego stopu w całej objętości  $t_t$ , s,
- czasy rafinacji – czas przetrzymywania kąpieli w stałej temperaturze  $t_r$ , s,

- zużycie energii topienia  $E_t$ , kWh,
- zużycie energii rafinacji  $E_r$ , kWh,
- całkowite zużycie energii  $E_c$ , kWh,

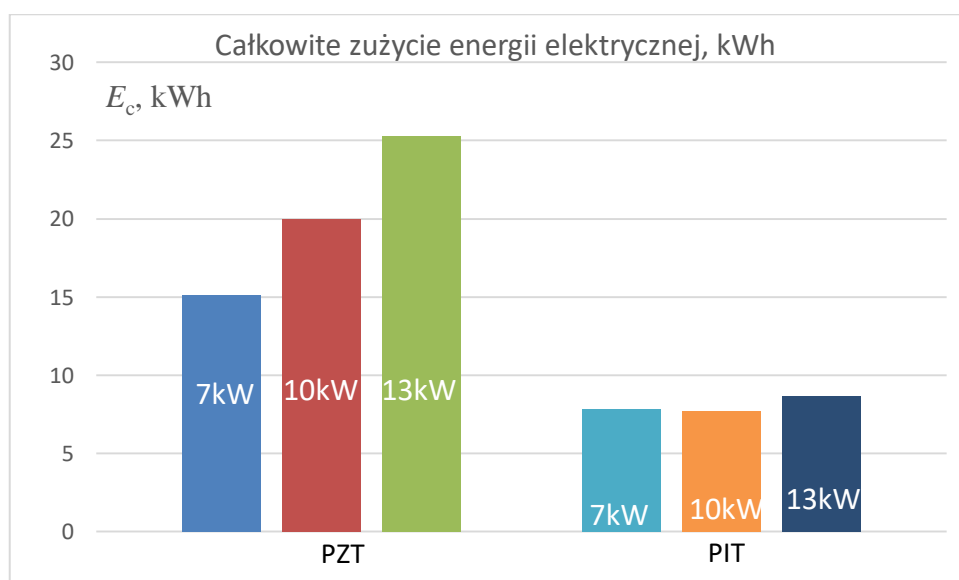
W każdym analizowanym przypadku masa wsadu była stała. Energię wyznaczono na podstawie znajomości mocy generatora. W obliczeniach pominięto inne urządzenia wykorzystywane w procesie tj. pompy czy układ sterowania.

Tabela 3.9.

## Parametry prowadzenia procesu rafinacji

$P$ , kW	$P_w$ , kW	$t_t$ , s	$t_r$ , s	$E_t$ , kWh	$E_r$ , kWh	$E_c$ , kWh
PZT						
70	7	176	600	3,42	11,67	15,09
100	10	119	600	3,31	16,67	19,97
130	13	100	600	3,61	21,67	25,28
PIT						
12	7	1750	600	5,83	2	7,83
17	10	1030	600	4,86	2,83	7,69
22	13	820	600	5,01	3,67	8,68

Na rys. 3.23 zestawiono wartości całkowitego zużycia energii w trakcie rafinacji stopu aluminium w urządzeniach PZT i PIT.



Rys. 3.23. Całkowite zużycie energii elektrycznej w PIT i PZT

Jak można zobaczyć na rys. 3.23, zużycie energii rafinacji stopu aluminium w PZT jest kilkakrotnie większe dla PIT. Przyrost wykorzystania energii dla pieca PZT jest

wprost proporcjonalny do przyrostu mocy pieca. Natomiast dla PIT wzrost mocy pieca nie powoduje proporcjonalnego zwiększenia zużycia energii. Jest to wynikiem dużo wyższej sprawności pieca PIT.

### 3.5 Podsumowanie

W rozdziale scharakteryzowano prowadzenie procesu rafinacji stopu aluminium w piecach indukcyjnych tyglowym i z „zimnym” tygłem. Omówiono sposoby prowadzenia procesu w obu piecach. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych. W trakcie topienia badanych stopów aluminium w PIT i PZT zaobserwowano znaczną różnicę w wielkości powierzchni ciekłej kąpieli metalicznej. Wyznaczone pola powierzchni powstałych menisków podczas topienia stopów z wykorzystaniem PZT są znacznie większe niż w PIT. Proces eliminacji cynku ze stopu aluminium w przypadku procesów rafinacyjnych prowadzonych w tej samej temperaturze i ciśnieniu przebiega intensywniej przy wykorzystaniu PZT. Jednak koszt energii elektrycznej potrzebnej do prowadzenia całego procesu jest kilkukrotnie wyższy dla PZT niż PIT.

### Bibliografia

1. A. Mühlbauer, History of Induction Heating and Melting, Vulkan, Essen, 2008.
2. J. Fasholtz, E. Decker, H. Rottgen, Induktive Erwärmung, Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, Heidelberg, Energie-Verlag, 1984.
3. M. Orfeuil, Electric Proces Heating, Technologies/Equipment/Applications, Battele Press, 1987.
4. Z. Pater, Podstawy metalurgii i odlewnictwa, Wyd. Politechniki Lubelskiej, 2014.
5. M. Orfeuil, Electric Process Heating–Technologies/Equipment/Applications, Batelle Press, Columbus Richland, 1987.
6. H. Wenzel, Induktives Schmelzen und Warmhalten von Gußeisen, RWE AG, Essen, 1987
7. J. Fasholz, G. Orth, Induktive Erwärmung – Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, RWE, AG, Essen, 1991.

8. Conference Proceedings of the International Conference on Vacuum Metallurgy, Linz 1985.
9. G. K. Bhat (ed.), Proceedings of the Conference Special Melting and Processing Technologies, San Diego, CA, Noyes Publications, New Jersey, 1989.
10. A. Choudhury: Vacuum Metallurgy, ASM International, 1990.
11. G. Duncan, Electric Furnace Steelmaking, Iron and Steel Society, Inc, Book Crafters, Inc., Chelsea, MI, USA, 161-166, 1985.
12. S.K. Dutta, A.B. Lele, N.K. Pancholi, Studies on direct reduced iron melting in induction furnace Trans. Indian Inst. Met. vol.57/5, 467-473, 2004.
13. C. Sajdak, E. Samek, Nagrzewanie indukcyjne, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1985.
14. M. Hering, Podstawy elektrotermii, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
15. Advanced Melting Technologies, Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry BCS, 2005.
16. V. Gandhewar, S. Bansod, A. Borade, International Journal of Engineering and Technology, vol. 3/4, 277-284, 2011.
17. D. Gombert, J. Richardson, A. Aloy D. Delbert, Cold-crucible design parameters for next generation HLW melters, WM'02 Conference, Tucson, 2002.
18. M. Vogt, F. Bernier, A. Mühlbauer, M. Blum G. Jarczyk, Experimental investigation of temperature field and energy flows in induction furnace with cold crucible and a practical application of the results, Proc. Int. Conf. Electromagnetic Processing of Materials EPM 2000, Nagoya, Japan, 289, 2000.
19. E. Baake, B. Nacke F. Bernier, M. Vogt, A. Mühlbauer, M. Blum, Experimental and numerical investigations of the temperature field and melt flow in the induction furnace with cold crucible, Proc. Int. Sem. on Heating by Internal Sources HIS, 21, 2001.
20. J. D. Lavers et al, Current distribution, forces and circulation in the coreless furnace, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 1/9, 1973.



21. V. Bojarevics, G. Djambazov, R. Harding, K. Pericleous M. Wickins, Investigation of the cold crucible melting, Process: Experimental and Numerical Study, Proc. Fifth Int. pamir Conf. on Fundamental and Applied MHD, 2, II- 77, 2002.
22. D. Delage, R. Ernst, J. Driole, Induction melting in a cold crucible, Proc. Symp. IUTAM, Cambridge,108, 1982.
23. A. Gagnoud, J. Etay, M. Garnier, The levitation melting process using cold crucible technique Garnier, Trans. ISIJ, 28, 36, 1988.
24. M. Vogt, F. Bernier, A. Mühlbauer, A. Muiznieks M. Blum, Thermal model of the cold crucible process, Proc. Int. Conf. Electromagnetic Processing of Materials UIE/EPM, Paris, 2, 389, 1997.
25. J. Lucas, Electromagnetic Induction and Electric Conduction in Industry, Centre .
26. A. Umbrashko, E. Baake, B. Nacke, M. Kirpo A. Jakovics, Improvement of the cold crucible melting process using LES modelling, Proc. 15th Riga and 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Fundamental and Applied MHD, 2, 23, 2005.
27. M. Bonvalot, E. Beaugnon, P. Courtois, P. Gillon, Magnetohydrodynamics, vol. 32/2, 196-200, 1996.
28. L. Tir, A. Gubchenko A. Prostyakov, Y. Brutskus, Increasing the technical and economic indexes of induction furnaces with a cold crucible, Sov. Electr. Engineering 55, 37, 1984.
29. P. Buliński, J. Smolka, S. Golak, R. Przyłucki, M. Palacz, G. Siwec, J. Lipart, R. Bialecki, L. Blacha, Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace, Applied Thermal Engineering, vol. 124, 1003-1013, 2017.
30. P. Buliński, J. Smolka, G. Siwec, L. Blacha, S. Golak, R. Przyłucki, M. Palacz, B. Melka, Numerical examination of the evaporation process within a vacuum induction furnace with a comparison to experimental results, Applied Thermal Engineering, vol. 150, 348-358, 2019.
31. P. Buliński, J. Smolka, S. Golak, R. Przyłucki, M. Palacz, G. Siwec, B. Melka, L. Blacha, Numerical modelling of multiphase flow and heat transfer within an induction skull melting furnace, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 126 (B), 980-992, 2018.

32. M. Palacz, B. Melka, B. Wecki, G. Siwiec, R. Przyłucki, P. Buliński, S. Golak, L. Blacha J. Smolka, Experimental Analysis of the Aluminium Melting Process in Industrial Cold Crucible Furnaces, *Metals and Materials International*, 1-13, 2019.

## List of figures

- Fig. 3.1. Induction crucible furnace [1].
- Fig. 3.2. Dependence of PIT electrical efficiency on the ratio of workpiece diameter to GWPE for aluminum [2].
- Fig. 3.3. Induction furnace with a cold crucible (PZT) [2].
- Fig. 3.4. A simplified PZT scheme [25].
- Fig. 3.5. PZT cross-section [25].
- Fig. 3.6. General view of experimental stand PIT.
- Fig. 3.7. PIT test stand: 1 - vacuum chamber, 2 - crucible, 3 - water cooled inductor, 4 - crucible tilting mechanism, 5 - furnace door, 6 - vacuum pump system, 7 - generator, 8 - sampling system and temperature measurement system, 9 - tilt control crucible, 10 - operator panel, 11 - sight glass, 12 - ingot mold, 13 - mold heater, 14 - control system, 15 - alloy additive introduction system, 16 - operator platform.
- Fig. 3.8. General view of the PZT.
- Fig. 3.9. PZT test stand: 1 - vacuum chamber, 2 - sluice for sampling and temperature measurement, 3 - generator, 4 - cooling system, 5 - control system, 6 - operator panel, 7 - explosion proof wall.
- Fig. 3.10. Ceramic crucible used in the PIT.
- Fig. 3.11. Copper crucible used in the PZT.
- Fig. 3.12. Location and dimensions of the PIT elements.
- Fig. 3.13. Location and dimensions of the PZT elements.
- Fig. 3.14. Diagram of the experiment implementation.
- Fig. 3.15. Scheme for determining the area of the meniscus
- Fig. 3.16. Meniscus shape obtained for the PIT (a) and PZT (b).
- Fig. 3.17. Screenshot from Wolfram Mathematica.
- Fig. 3.18. Description of experiments.
- Fig. 3.19. Dependence of zinc mass loss on the pressure in the PIT chamber.
- Fig. 3.20. The dependence of the flux density on the pressure in the PIT chamber.
- Fig. 3.21. Dependence of zinc mass loss on the pressure in the PZT chamber.
- Fig. 3.22. The dependence of the flux density on the pressure in the PZT chamber.
- Fig. 3.23. Total electricity consumption in the PIT and PZT.

Mariusz WNEK<sup>1</sup>

## Rozdział 4

# MODELOWANIE CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNEJ KOMPAKTOWYCH REGENERATORÓW CIEPŁA DLA PALNIKÓW GAZOWYCH

### Oznaczenia

- A - pole powierzchni transportu ciepła, m<sup>2</sup>  
A<sub>L</sub> - pole powierzchni transportu ciepła odniesione do jednostki długości, m<sup>2</sup>/m  
A<sub>S</sub> - współczynnik konstrukcyjny regeneratora, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>  
c<sub>p</sub> - pojemność cieplna właściwa przy niezmiennym ciśnieniu, J/(kg·K)  
H - wysokość płyty (model zastępczy wypełnienia regeneratora), m  
k - dyfuzyjność, m<sup>2</sup>/s  
L - długość kanału wypełnienia regeneratora, m  
ṁ - strumień masy, kg/s  
t - czas, s  
t<sub>r</sub> - czas trwania jednej fazy działania regeneratora (czas rewersji), s  
t<sub>0</sub> - czas okresu działania regeneratora, suma czasów fazy grzania i chłodzenia, s  
T<sub>0</sub> - temperatura początkowa, °C  
T<sub>a0</sub> - temperatura powietrza na wlocie do regeneratora, °C  
T<sub>s0</sub> - temperatura spalin na wlocie do regeneratora, °C  
V - objętość wypełnienia regeneratora, m<sup>3</sup>  
x - współrzędna układu prostokątnego, m  
y - współrzędna układu prostokątnego, m  
z - współrzędna układu prostokątnego, m  
α - współczynnik wnikania ciepła, W/(m<sup>2</sup>·K)  
δ - wymiar charakterystyczny (połowa grubości płyty), m  
λ - współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K)  
ρ - gęstość, kg/m<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Katedra Informatyki Przemysłowej

### ***Indeksy***

- a - powietrze,
- F - ogólne oznaczenie płynu (powietrze lub spaliny),
- ot - dotyczy otoczenia,
- s - spaliny,
- sr - średnia,
- sc - dotyczy ścianki.
- W - dotyczy wypełnienia regeneratora,

## **4.1 Wprowadzenie**

Ekonomiczne i bardzo restrykcyjne, w ostatnim czasie, wymogi ekologiczne stawiane nowoczesnym piecom przemysłowym związane są ze wzrostem ich sprawności, zmniejszeniem emisji zanieczyszczeń do otoczenia i wysoką jakością nagrzewania wsadu. W piecach grzewczych (opalanych paliwem gazowym) wykorzystywane jest powszechnie podgrzewanie powietrza spalania, jako sposób zwiększenia ich sprawności energetycznej. Równoczesne zastosowanie intensywnej cyrkulacji spalin, wymuszonej gazodynamiką substratów w komorze pieca, pozwala również skutecznie zapobiegać tworzeniu tlenków azotu w spalinach, dzięki czemu możliwe jest podgrzewanie powietrza nawet ponad 1000°C bez obawy przekroczenia dopuszczalnych stężeń NO<sub>x</sub>. Wyrównanie temperatury i składu spalin w komorze pieca poprawia jednocześnie jakość grzania materiału [1, 2].

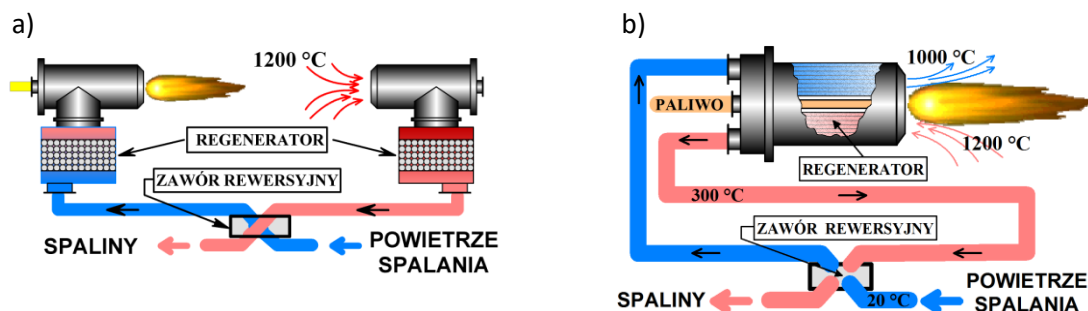
W przypadku wielopalnikowego systemu opalania pieców grzewczych praktykowane jest wyposażanie palników w indywidualne podgrzewacze powietrza, przy czym w przypadku podgrzewania do bardzo wysokiej temperatury jest to realizowane w regeneratorach (rys. 4.1), których konstrukcja i sposób sterowania powinny dążyć do zmaksymalizowania intensyfikacji transportu ciepła. Technika wysokiego podgrzewania powietrza spalania określana jest jako HTC (High temperature combustion), High Temperature Air Combustion (HTAC) lub High Preheated Air Combustion (HPAC) [3 – 6].

Regenerator działa w stanie nieustalonym. Jego temperatura, jak również temperatura przepływających przez niego płynów są funkcjami czasu i przestrzeni. Jednakże

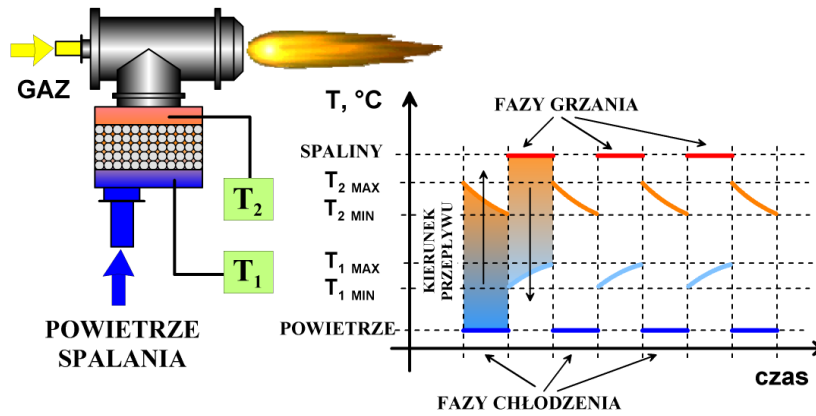
z inżynierskiego punktu widzenia lub użytkowego najbardziej znaczące są temperatury płynów wylotowych, a w szczególności temperatura powietrza spalania. Wartość tej temperatury zmienia się w całej fazie. Najwyższą temperaturę powietrze uzyskuje na początku fazy chłodzenia, a najniższą na jej końcu, jak przedstawiono na rys. 4.2. Powodem tego zjawiska jest strumień energii, przepływający między wypełnieniem regeneratora a powietrzem spalania, którego wartość jest najwyższa na początku tego okresu i wynika z największej różnicy temperatury pomiędzy wypełnieniem-płyn. Podczas całego tego okresu temperatura wypełnienia obniża się (dlatego też nazywany jest okresem chłodzenia), coraz mniejsza ilość energii przepływa do powietrza, co objawia się zmniejszaniem jego temperatury aż do wartości minimalnej na końcu okresu – tuż przed zmianą na okres grzania.

Po odpowiednio długim czasie działania regeneratora można zidentyfikować stan, który w charakterystyce dynamicznej określa się jako pseudoustalony (rys. 4.3). Oznacza to, że temperatury wypełnienia i płynów są jednakowe dla tych samych czasów kolejnych faz po upływie każdego okresu działania regeneratora, jednakże przez cały czas podlegają fluktuacji między wartością minimalną i maksymalną. Dopiero dla takiego stanu działania regeneratora określa się średnią temperaturę płynów wylotowych [7, 8].

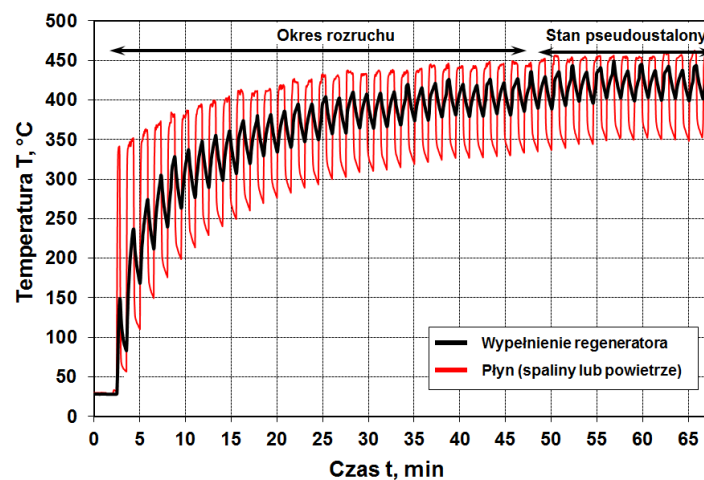
W najnowszych rozwiązaniach palników, z zainstalowanymi indywidualnymi regeneratorami ciepła, możliwe jest uzyskanie temperatury podgrzewu powietrza nawet powyżej  $1100^{\circ}\text{C}$  przy temperaturze spalin wylotowych  $1200^{\circ}\text{C}$ . Taka technologia wymaga jednak stosowania materiałów, które w warunkach zmienności temperatury (w szerokim zakresie) zapewnią długą żywotność działania urządzenia [5, 6, 9 – 11].



Rys. 4.1. Palniki regeneracyjne: a) podłączone regeneratory, b) zintegrowany regenerator



Rys. 4.2. Charakterystyka temperaturowa regeneratora z podziałem na fazy działania

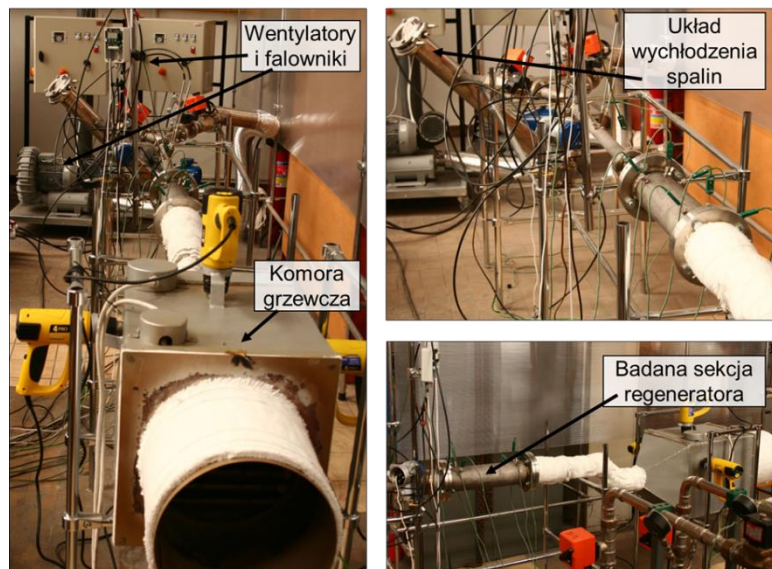


Rys. 4.3. Charakterystyka dynamiczna regeneratora

W ramach badań własnych opracowano matematyczny model regeneratora, który następnie został wykorzystany w komputerowym programie symulacyjnym. W celu walidacji tego modelu przeprowadzono również badania stanowiskowe z wykorzystaniem pieca kuziennego (rys. 4.4) Rys. 4.4 lub przepływowej komory grzewczej (rys. 4.5). W pierwszym przypadku badań wytwornicą spalin był niezależny palnik GAFT o mocy do 250 kW, a w drugim spaliny zostały zastąpione powietrzem podgrzewanym w zaprojektowanej i zbudowanej, wg autorskiej koncepcji, komorze.



Rys. 4.4. Stanowisko badawcze regeneratora ciepła – piec kuzienny



Rys. 4.5. Stanowisko do badania charakterystyk dynamicznych regeneratora

## 4.2 Obiekt analizy

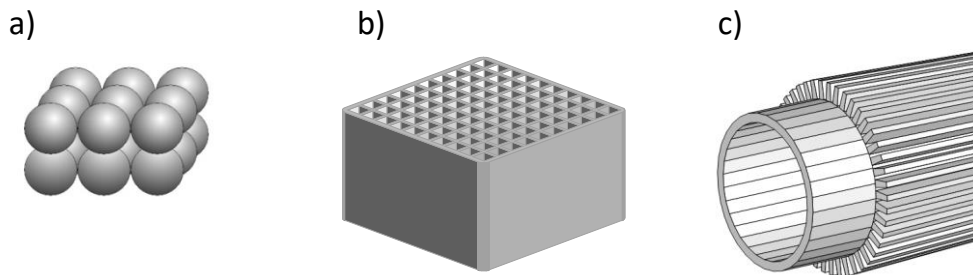
Obiektem analizy jest wypełnienie regeneratora, które będąc pewnego rodzaju akumulatorem energii cieplnej, powinno charakteryzować się dużą zdolnością do magazynowania tej energii podczas fazy grzania i następnie możliwością przekazania jej w maksymalnej ilości do powietrza spalania podczas fazy chłodzenia.

Przegląd danych literaturowych wskazuje, że najwyższe temperatury podgrzania powietrza spalania są na ogół uzyskiwane w regeneratorach o wysokim współczynniku konstrukcyjnym  $A_s$  (4.1), wyrażającym stosunek powierzchni grzewczej do objętości jego wypełnienia [2, 3, 12]. Jak prezentują badania laboratoryjne i modelowe

projektowane wypełnienie regeneratora, aby zapewnić zadawalający poziom podgrzania powietrza spalania, powinno odznaczać się wartością  $A_s$  powyżej  $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Jednakże ten parametr nie jest jedyny i decydujący o wartości podgrzewu powietrza – uzyskanie pożądanego efektu zależy również od parametrów termodynamicznych przepływających płynów, jak również od własności materiałów konstrukcyjnych regeneratora.

$$A_s = \left( \frac{A}{V} \right)_{\Rightarrow \max} \cdot \quad (4.1)$$

Na rys. 4.6 przedstawiono wybrane przykłady typów wypełnienia regeneracyjnego, stosowane w gazowych palnikach regeneracyjnych. Liczne dane literaturowe dość jednoznacznie określają, że ze względu na możliwość uzyskiwania bardzo wysokich podgrzewów powietrza spalania najbardziej właściwym jest wypełnienie honeycomb [3 – 5]. Jednakże bardzo wysokie parametry termiczne uzyskuje również konstrukcja sunflower [13], będąca autorskim projektem, która w połączeniu z palnikiem charakteryzuje się jeszcze dodatkowymi zaletami tj.: wyrównaniem pola temperaturowego płomienia bez tzw. pików temperatury i niską emisyjnością  $\text{NO}_x$ , gdyż rozwiązanie wykorzystuje ideę palnika GAFT [1] oraz niższymi kosztami wytworzenia i serwisowania.



Rys. 4.6. Typy wypełnienia regeneratora: a) kulkowe, b) honeycomb, c) sunflower

Ze względu na podstawowe założenia podczas projektowania kompaktowych regeneratorów ciepła, niezmiernie istotnym zadaniem jest właściwy dobór parametrów konstrukcyjnych wypełnienia oraz wybór odpowiednich materiałów [14, 15].

Parametry konstrukcyjne powinny być typowane pod kątem mocy palnika, liczby nadmiaru powietrza spalania, małych oporów przepływu płynów, możliwości wykonawczych oraz intensyfikacji transportu ciepła.

W przypadku doboru materiału wypełnienia regeneracyjnego bardzo istotnym parametrem jest jego zdolność do magazynowania energii cieplnej - definiowana, jako



iloczyn jego gęstości i pojemności cieplnej właściwej określany, jako pojemność cieplna objętościowa (tab. 4.1). Jeżeli iloczyn ten przyjmuje wartość większą od 1 MJ/(m<sup>3</sup>K) można uważać dany materiał za dobre medium magazynujące energię ciepłą [16].

Kolejną ważną właściwością materiału jest dyfuzyjność - zwana również współczynnikiem wyrównywania temperatury lub współczynnikiem przewodzenia temperatury (tab. 4.1). Dyfuzyjność określana jest jako iloraz współczynnika przewodzenia ciepła i iloczynu gęstości materiału wypełnienia regeneratora oraz jego pojemności cieplnej właściwej. Wraz ze wzrostem wartości dyfuzyjności wzrasta zdolność materiału do wyrównywania temperatury w całej swojej objętości, a materiały takie są coraz lepszymi przewodnikami ciepła.

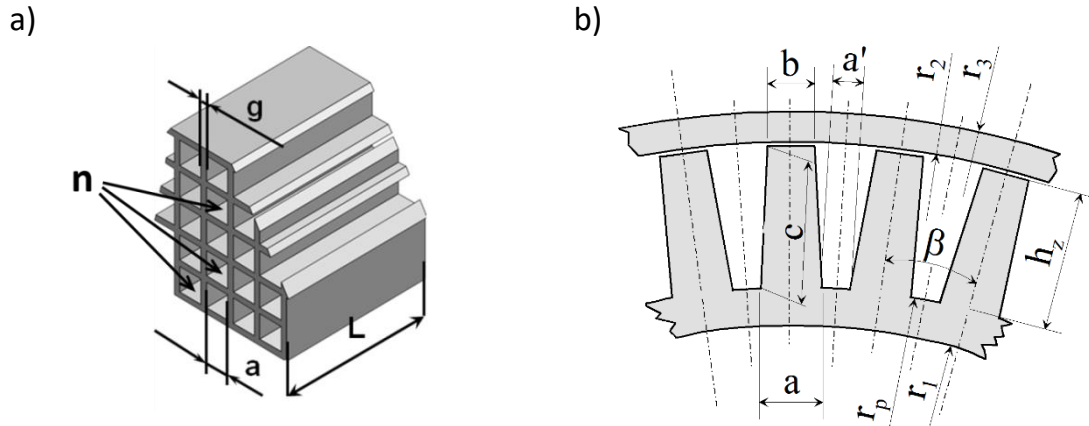
Tablica 4.1.  
Właściwości wybranych materiałów do budowy regeneratora ciepła [17]

Lp.	Nazwa handlowa lub oznaczenie	Gęstość $\rho, \frac{kg}{m^3}$	Współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda, \frac{W}{m \cdot K}$	Pojemność cieplna właściwa $c_p, \frac{J}{kg \cdot K}$	Pojemność cieplna objętościowa $\rho c_p, \frac{MJ}{m^3 K}$	Dyfuzyjność $k \cdot 10^7, m^2/s$
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 86TC	3600	15	2300	8,28	18,1
2	Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub> 50ZA	3200	1,9	2700	8,64	2,2
3	MgO 96TC	2800	13	1200	3,36	38,7
4	SiC CarSIK	3100	150	1700	5,27	284,6
5	SiC	2650	25	1000	2,65	94,3
6	SiC CarSIK70ZA	2100	7	2300	4,83	14,5
8	Stal H25N20S2	7900	19	500	3,95	48,1

W przypadku wyboru wypełnienia honeycomb (rys. 4.6b) poszukiwanymi parametrami opisującymi konstrukcję wypełnienia regeneratora są (rys. 4.7 a): a – wielkość definiująca wymiar przyjętej geometrii kanału przepływu, g – grubość ścianki, L – długość kanału, n – liczba kanałów przepływowych. Natomiast dla wypełnienia sunflower (rys. 4.6 c) liczba parametrów konstrukcyjnych jest znacznie większa (rys. 4.7 b), a ich właściwy dobór nie jest prosty.

W zasadzie dla obu przypadków (honeycomb i sunflower – rys. 4.7) należy zastosować rozwiązania numeryczne, które wstępnie wskażą odpowiednie parametry

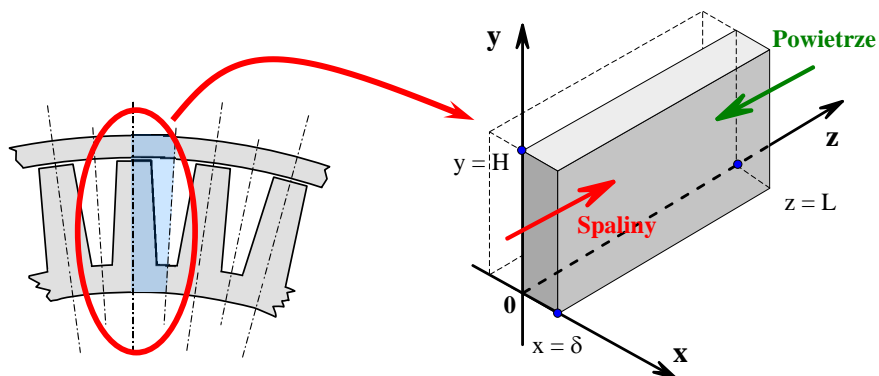
konstrukcyjne, a następnie powinno się rozwiązać ich model dynamiczny, który wygeneruje charakterystykę działania regeneratora i uzyskiwane parametry wyjściowe dla pseudostabilnego stanu.



Rys. 4.7. Parametry konstrukcyjne wypełnienia regeneratora: a) honeycomb, b) sunflower

### 4.3 Model matematyczny

Rozwiązania analityczne Fouriera-Kirchhoffa, opisujące pole temperatury w wypełnieniu, dotyczą przede wszystkim prostej geometrii takiej jak płyta, cylinder, pręt lub kula [18 – 21]. Ze względu na przyjęcie numerycznej metody modelowania charakterystyki regeneratora zastosowano uproszczoną teorię regeneratorów ciepła, w której m.in. rzeczywiste wypełnienie jest transformowane do postaci prostszej geometrii. Dla konstrukcji sunflower (rys. 4.7 b) formę przetransformowaną stanowi płyta o skończonych wymiarach  $2\delta \times H \times L$  (rys. 4.8).



Rys. 4.8. Płytowy model zastępczy regeneratora przeciwprądowego sunflower

Dla rozważanej geometrii regeneratora należy określić wielkości geometryczne modelu zastępczego. Zdefiniowanymi wielkościami geometrycznymi płytowego modelu zastępczego regeneratora, dla konstrukcji sunflower, jest połowa grubości płyty  $\delta$  (4.2) oraz jej wysokość  $H$  (4.3). Natomiast długość modelu płytowego jest równa rzeczywistej długości kanałów przepływowych wypełnienia.

$$\delta = \frac{\frac{\beta\pi}{360}(r_3^2 - r_2^2 - r_1^2) + \frac{r_p}{2}(a + a') + \frac{h_z}{2}(a + b)}{\frac{\beta\pi r_2}{180} - b + 2c + a'}, \quad (4.2)$$

gdzie: *wielkości geometryczne* wg rys. 4.7b.

$$H = \frac{\beta\pi r_2}{180} - b + a' + \sqrt{a^2 - 2ab + b^2 + 4h_z^2}, \quad (4.3)$$

gdzie: *wielkości geometryczne* wg rys. 4.7b.

Pole temperatury  $T$  w funkcji czasu  $t$  dla modelu płytowego wypełnienia określone jest rozwiązaniem równania Fouriera-Kirchhoffa przy założeniu braku wewnętrznych źródeł ciepła:

$$\rho_w(T)c_{pw}(T)\frac{\partial T_w(x, z, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}(\lambda_w(T)\vec{\nabla}T_w(x, z, t)). \quad (4.4)$$

Brak szczegółowych informacji o zależnościach  $\rho_w(T)$ ,  $c_{pw}(T)$  oraz  $\lambda_w(T)$  dla materiałów wypełnień sprawia, że wielkości te zakładane są na ogół w rozwiązaniach jako niezmiennie, co pozwala zapisać równanie (4.4) w postaci:

$$\frac{\partial T_w(x, z, t)}{\partial t} = a_w \nabla^2 T_w(x, z, t), \quad (4.5)$$

w której operator Nabla określony jest zależnością:

$$\nabla^2 T_w(x, z, t) = \frac{\partial^2 T_w(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w(x, z, t)}{\partial z^2}, \quad (4.6)$$

natomiast współczynnik wyrównywania temperatury zwany także współczynnikiem przewodzenia temperatury lub dyfuzyjnością cieplną jest zdefiniowany jako:

$$a_w = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{pw}}. \quad (4.7)$$

Warunki początkowo-brzegowe mają postać:

$$- \text{warunek początkowy } T_w(x, z, 0) = T_0, \quad (4.8)$$

$$- \text{warunek brzegowy na płaszczyźnie symetrii } yz \left. \frac{\partial T_w(x, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (4.9)$$

a warunki brzegowe na pozostałych powierzchniach bocznych przekazujących ciepło między wypełnieniem „W” i płynem „F” na drodze konwekcji przy współczynniku wnikania ciepła  $\alpha$ :

$$- \lambda_w \left. \frac{\partial T_w(x, z, t)}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha(z)(T_w(\delta, z, t) - T_F(z, t)), \quad (4.10)$$

$$- \lambda_w \left. \frac{\partial T_w(x, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha(0)(T_w(x, 0, t) - T_F(0, t)), \quad (4.11)$$

$$- \lambda_w \left. \frac{\partial T_w(x, z, t)}{\partial z} \right|_{z=L} = \alpha(L)(T_w(x, L, t) - T_F(L, t)), \quad (4.12)$$

$$\left. \frac{\partial T_w(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_w(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=H} = 0. \quad (4.13)$$

Warunek (4.10) jest narzucony przez ciągłość strumienia ciepła i wynika z założenia, że na granicy płyta-płyn  $x=\delta$  ciepło jest transportowane na drodze konwekcji. Warunki (4.11) i (4.12) zakładają, że na powierzchni czołowej regeneratora również występuje transport strumienia ciepła na drodze konwekcji. Indeks „F” oznacza ogólnie płyn, zatem warunki dotyczą spalin lub powietrza, w zależności, które medium przepływa przez wypełnienie regeneratora.

Bilans energii dla płynów o strumieniu  $\dot{m}_F$  omywających boczną powierzchnię płyty ( $A_L$ ) sprowadza się do postaci:

$$\dot{m}_F c_{pF}(T) \frac{\partial T_F(z, t)}{\partial z} = A_L \alpha(z)(T_w(\delta, z, t) - T_F(z, t)). \quad (4.14)$$

Warunki dla płynów określone są przez znane temperatury spalin „s” i powietrza „a” na dopływach do regeneratora:

$$T_s(0, t) = T_{s0}; \quad T_a(L, t) = T_{a0}. \quad (4.15)$$

Obliczenia regeneratorów nie należą do zagadnień łatwych [16, 20, 22]. Trudności wynikają z nakładania się zjawiska okresowej zmienności pola temperatury wypełnienia i problemów dotyczących przeciwpłądowego, przemiennego przepływu spalin i powietrza. Stąd też liczne uproszczenia, w których pomija się wzdłużne przewodzenie

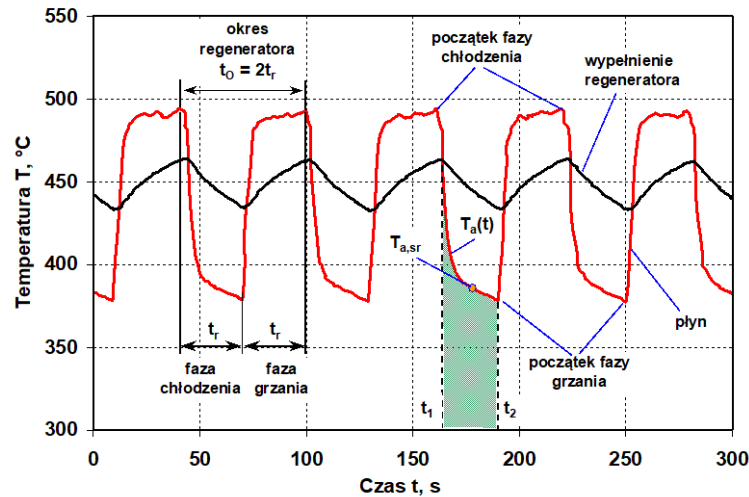
ciepła, a dla modelu idealnego wypełnienia przyjmuje się m.in. nieskończenie duży współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$  w kierunku prostopadłym do powierzchni. Zatem wskazane jest zastosowanie metod numerycznych, z których najbardziej popularną jest metoda różnic skończonych (MRS) [16, 22 – 26]. Metoda ta polega na dyskretyzacji przestrzeni i czasu, a zamiast pochodnych cząstkowych temperatury względem współrzędnych przestrzeni i czasu występują odpowiednie ilorazy różnicowe. W tej samej postaci (ilorazów różnicowych) przedstawia się również warunki początkowe i brzegowe.

W ramach prowadzonych badań własnych rozwiązanie modelu regeneratora uzyskano numerycznie, a w tym celu opracowano program komputerowy. W rozwiązaniu numerycznym zastosowano tzw. metodę jawną - czyli dla wszystkich węzłów siatki rozpatrywanego modelu, powstałej podczas dyskretyzacji, sporządza się równania różnicowe z ilorazem różnicowym przednim.

W modelu działania regeneratora założono jednakowy czas przepływu spalin i powietrza spalania przez wypełnienie regeneratora (rys. 4.9), zwany czasem rewersji  $t_r$ . Czas ten określa fazę grzania lub chłodzenia wypełnienia. Przy czym pełny okres działania regeneratora  $t_0$  równy jest sumie długości trwania tych faz, czyli  $t_0 = 2t_r$ . Przyjęto, że czas przełączenia regeneratora z fazy grzania na fazę chłodzenia i odwrotnie jest niedługi w porównaniu z czasem okresu, stąd też jest pomijany. Przy założeniu procesu izobarycznego przyrost energii objętości elementarnej fazy stałej lub gazowej jest przyrostem entalpii. Założono również, że wypełnienie posiada wyrównaną w całej swojej objętości temperaturę początkową  $T_{w0}$ , kanały regeneratora wypełnia płyn o temperaturze  $T_{F0}$ , niezmienna w czasie jest temperatura płynów na dolotach  $T_{s0}$  i  $T_{a0}$ , niezmiennie są strumienie płynów na dolotach (spalin i powietrza) - wynikające z mocy palnika, przepływ ciepła pomiędzy wypełnieniem regeneratora a płynami odbywa się tylko na drodze konwekcji oraz przewodzenie ciepła w modelu regeneratora odbywa się w kierunku równoległym i prostopadłym do przepływu płynu.

Podstawą obliczeń numerycznych regeneratora w stanie nieustalonym, przyjętą w symulacyjnym programie komputerowym, są równania bilansu energii dla fazy płynnej (spalin i powietrza) oraz fazy stałej (wypełnienia regeneratora) z wykorzystaniem tzw. metody bilansów elementarnych [16, 26, 27]. Dla każdej objętości elementarnej sporządza się równania bilansowe. Program umożliwia prowadzenie symulacji dla dwóch rodzajów modeli - ze wzdłużnym podziałem oraz ze wzdłużno-poprzecznym. Kryterium wyboru modelu jest liczba Biota (4.16), która przyjmując wartość  $Bi < 0,1$  wskazuje na wyrównanie temperatury w ścianie, stąd też można pominąć poprzeczny podział modelu, co również wpływa na czas obliczeń.

$$Bi = \frac{\alpha_b Y}{\lambda_w}, \quad (4.16)$$



Rys. 4.9 Fazy regeneratora na podstawie zmierzonego przebiegu temperatury dla  $z = L$

#### 4.4 Badania modelowe

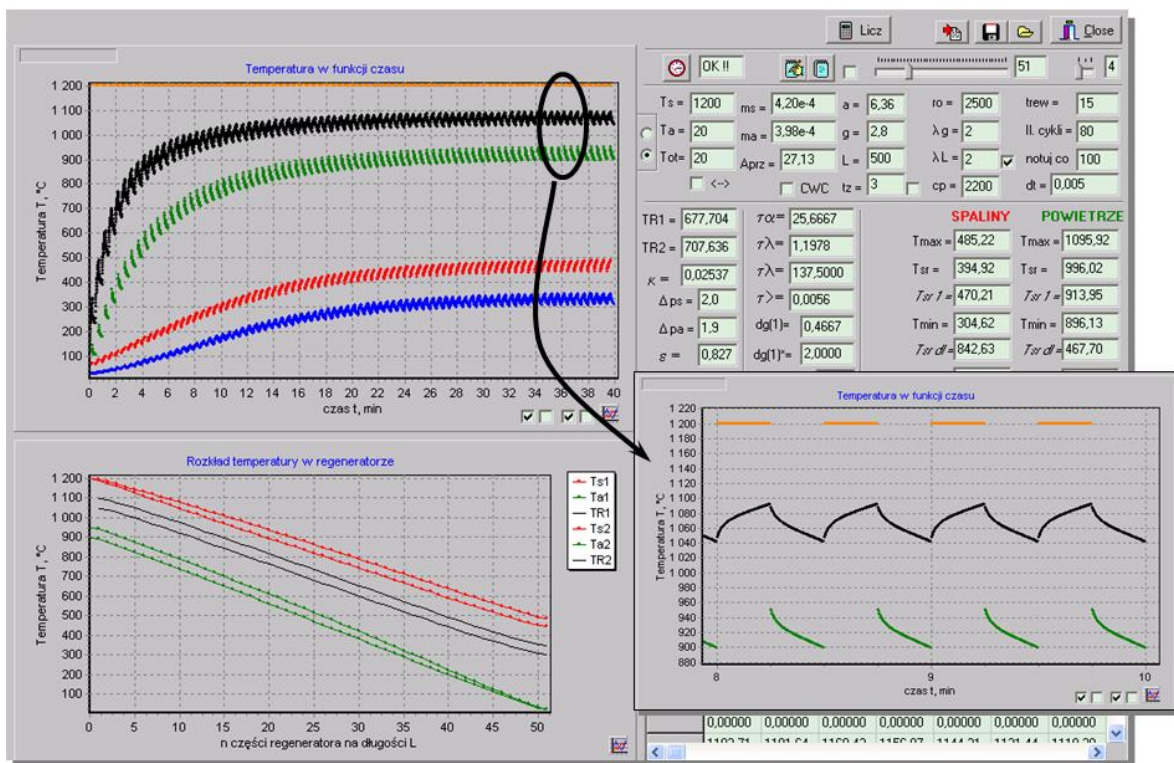
Na podstawie opracowanego matematycznego modelu regeneratora ciepła powstał program komputerowy, który służy do symulacji działania regeneratora i jego nieustalonych stanów cieplnych (rys. 4.10 i rys. 4.11). Symulacja wykonana przy użyciu tego programu umożliwia wyznaczenie:

- charakterystyki dynamicznej rozruchu regeneratora i jego stanów pseudoustalonych,
- temperatury płynów i ich zmienności na wylotach z regeneratora w pseudoustalonych stanach jego działania dla różnych poziomów temperaturowych pieca,
- wpływu zmian czasów rewersji na temperaturę powietrza spalania,
- wpływu zmiany mocy palnika na temperaturę podgrzewanego powietrza,
- rozkładu temperatury wypełnienia i płynów w dowolnej chwili działania regeneratora.

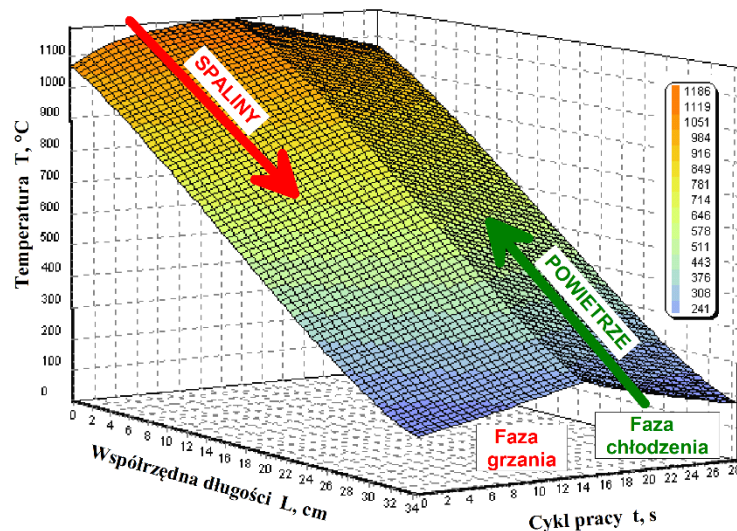
Walidację matematycznego modelu regeneratora ciepła i rozwiązania numerycznego przeprowadzono w oparciu o badania stanowiskowe. Podczas symulacji numerycznych

wykorzystywano warunki początkowe zbliżone do tych, które zarejestrowano podczas badań eksperymentalnych. Analiza porównawcza uzyskanych wyników numerycznych i eksperymentalnych, dla podstawowej charakterystyki dynamicznej, była bardzo zadawalająca.

Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych i przeprowadzonej walidacji modelu numerycznego wykonano kolejne badania, których celem było sprawdzenie wpływu pominięcia wzdłużnego przewodzenia ciepła w matematycznym modelu działania regeneratora na uzyskiwane temperatury podgrzewanego powietrza oraz profile temperaturowe wypełnienia regeneratora.



Rys. 4.10. „Okno użytkownika” programu komputerowego do symulacji działania regeneratora



Rys. 4.11. Wykres 3D pola temperatury wypełnienia regeneratora w autorskim programie do symulacji działania regeneratora

#### 4.5 Dyskusja wyników

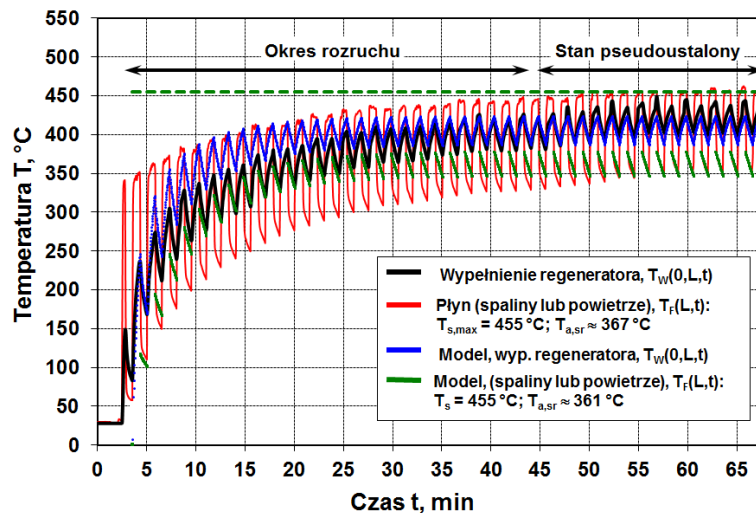
Na rys. 4.9 przedstawiono charakterystyczne fazy działania regeneratora zarejestrowane podczas badań. Linia czerwoną oznaczono przebiegi czasowe temperatury płynów, a linią czarną wypełnienie regeneratora. Temperatura wypełnienia jest rejestrowana czujnikiem termoelektrycznym umieszczonym w osi żebra i w połowie jego wysokości, a temperatura płynu w osi kanału i także w połowie jego wysokości. Czujniki termoelektryczne zostały dobrane pod kątem dynamiki zachodzących zjawisk [28, 29] w badanym regeneratorze.

Średnią temperaturę podgrzanego powietrza  $T_{a,sr}$  wpływającego z wypełnienia regeneratora w przedziale czasowym  $t_1-t_2$  zdefiniowano następująco:

$$T_{a,sr} = \int_{t_1}^{t_2} T_a(t) dt / (t_2 - t_1). \quad (4.17)$$

Rys. 4.12 przedstawia rozruch regeneratora w piecu o temperaturze ok. 455°C, zarejestrowany podczas eksperymentów, na tle symulacji numerycznej dla strumienia powietrza 64,4 kg/h i strumienia spalin 68 kg/h. Widoczne jest uzyskiwanie przez wypełnienie stanu pseudoustalonego po okresie ok. 50 min. Po osiągnięciu stanu pseudoustalonego średnia temperatura podgrzanego powietrza wyniosła 367°C dla eksperymentu i 361°C dla badań numerycznych, co stanowi różnicę 1,6%.



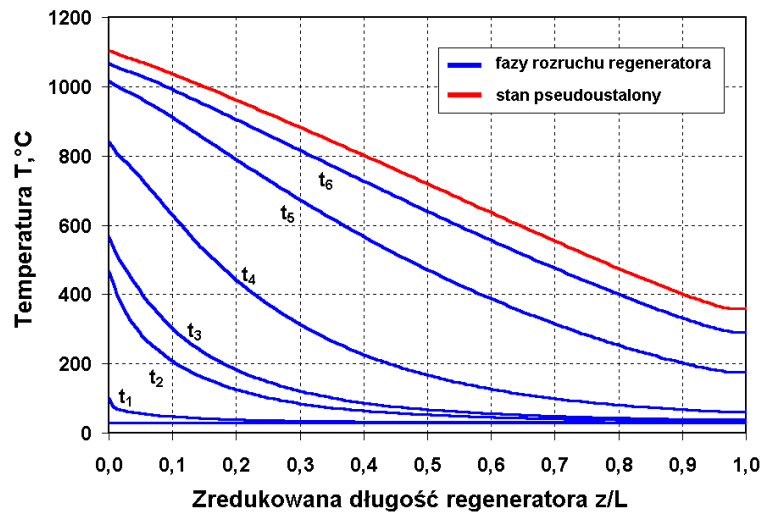


Rys. 4.12. Charakterystyka rozruchu regeneratora – badania eksperymentalne i symulacyjne

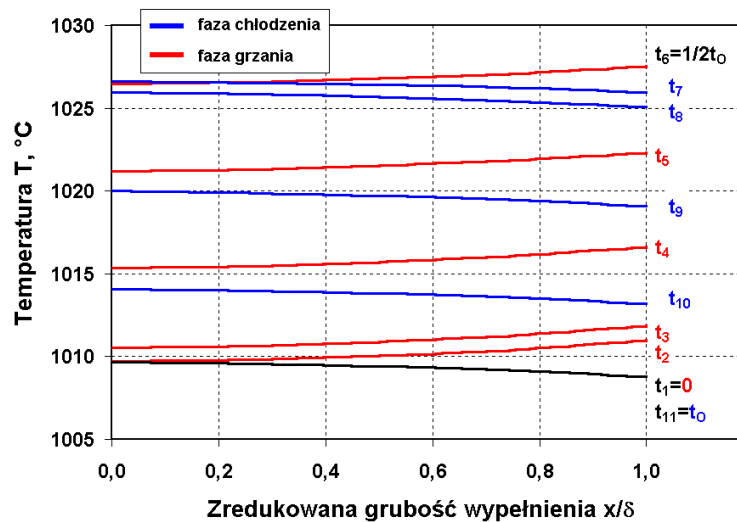
Wykorzystując program komputerowy można prześledzić rozruch regeneratora i kształtowanie się jego pola temperaturowego w kierunku współrzędnej „z”, czyli po jego długości, co zostało zaprezentowane na rys. 4.13. Krzywe o oznaczeniach  $t_1 - t_6$  przedstawiają rozkłady temperatury w przykładowo wybranych czasach działania regeneratora podczas tzw. okresu rozruchu, natomiast krzywa, wykreślona kolorem czerwonym, przedstawia profil temperaturowy wypełnienia regeneratora znajdującego się już w stanie pseudoustalonym. W przypadku tej charakterystyki pewnym mankamentem jest brak bezpośredniej informacji (odczytywanej z wykresu) dotyczącej wartości czasu, jaki jest potrzebny do uzyskania przez regeneratore tego stanu.

Na rys. 4.14 zaprezentowano przykładowe profile temperaturowe w żebrach regeneratora tzn. w kierunku współrzędnej „x”, w różnych momentach okresu regeneratore symbolicznie oznaczonych literką t. W chwilach  $t_1$  i  $t_{11}$  występuje zmiana faz z chłodzenia na grzanie oraz podobnie w chwili  $t_6$ , jednakże tutaj kończy się faza grzania, a rozpoczyna faza chłodzenia. Zakres  $t_1 - t_6$  przedstawia kształtowanie się profilu temperaturowego podczas ogrzewania wypełnienia od przepływających przez nie spalin, natomiast od  $t_6$  do  $t_{11}$  występuje wychładzanie wypełnienia przez przepływające powietrze. Dla tego przypadku różnica temperatury pomiędzy charakterystycznymi momentami przełączania faz wynosi ok.  $19^\circ\text{C}$ , a gradient temperatury w kierunku osi żebra regeneratore nie jest większy od  $2^\circ\text{C}$ . Zauważa się, że większym zmianom temperaturowym podlegają zewnętrzne części wypełnienia, czyli mające kontakt z płynami. Przemieszczając się w kierunku osi symetrii  $x = 0$  wahania temperatury maleją i maleją tym bardziej, im większe są opory przepływu ciepła.

Dla materiałów o małych oporach cieplnych występuje sytuacja, w której temperatura wypełnienia w jego osi jest zbliżona do temperatury dla  $x = \delta$ , a jej zmienność w tych miejscach, na przełomie okresu działania regeneratora, będzie podobna.



Rys. 4.13. Rozkład temperatury w wypełnieniu w kierunku współrzędnej „z” w różnych chwilach czasowych

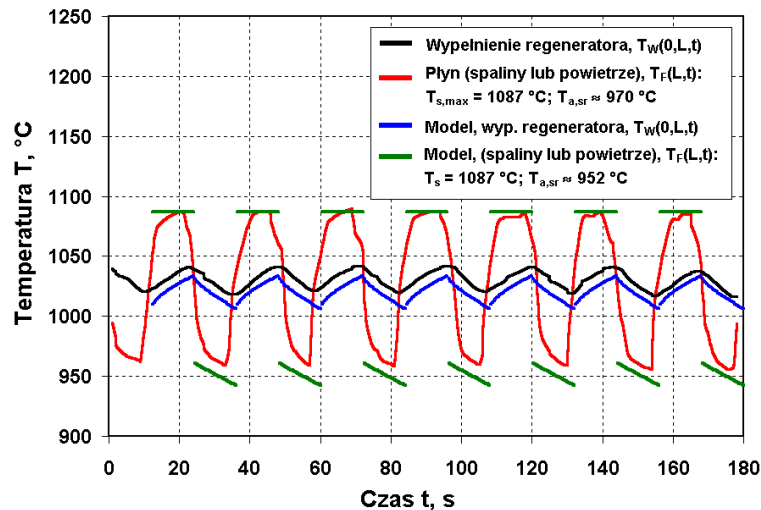


Rys. 4.14. Rozkład temperatury w wypełnieniu dla  $z=L$  w kierunku współrzędnej „x” w różnych momentach okresu regeneratora

Obie charakterystyki (rys. 4.13 i rys. 4.14) dostarczają wartościowych informacji na temat zmienności profilu temperaturowego wypełnienia regeneratora i są cennym źródłem dopełniającym charakterystykę prezentowaną na rys. 4.12.

Rys. 4.15 ilustruje porównanie reprezentatywnych temperatur dla stanu pseudoustalonego działania regeneratora w piecu kuziennym o temperaturze spalin  $1087^{\circ}\text{C}$  przy okresie  $t_0 = 2 \times 12$  s, strumieniu powietrza  $64,4$  kg/h i strumieniu spalin  $68$  kg/h. Średnia temperatura powietrza zarejestrowana w eksperymencie wyniosła

970°C, podczas gdy symulacja numeryczna wykazała wartość 952°C, co oznacza błąd modelowania ok. 1,9%. Przedstawiona na rysunku charakterystyka temperaturowa wypełnienia dotyczy osi symetrii wzdłużnego żebra wypełnienia sunflower od strony wlotu spalin. Również temperatury płynów prezentowane na tym rysunku dotyczą strony od wlotu spalin.



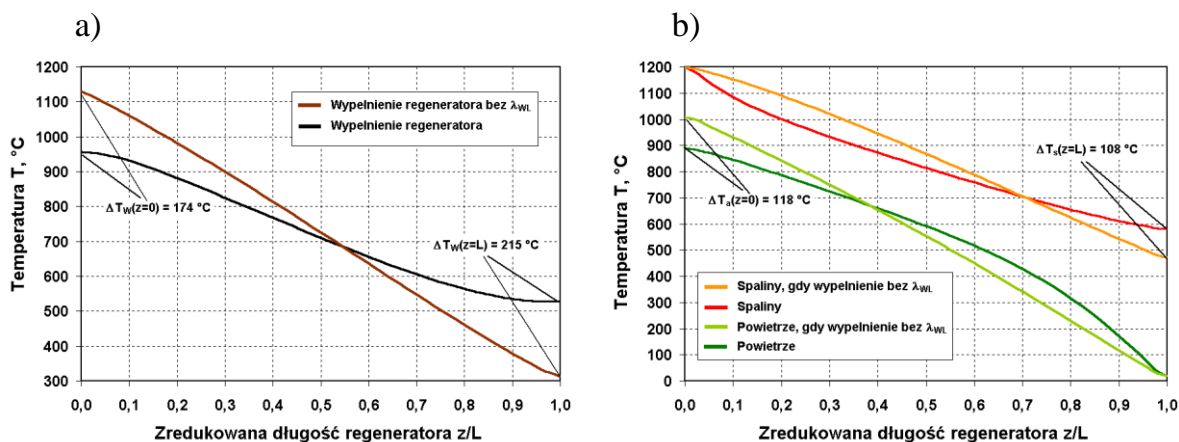
Rys. 4.15. Porównanie modelowania numerycznego z eksperymentem

Na rys. 4.16 zaprezentowano wpływ uwzględniania wzdłużnego przewodzenia ciepła w modelu. W tym przypadku zasymulowano wypełnienie wykonane z ceramiki SiSiC [30], która charakteryzuje się dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła  $\lambda = 150 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Badania numeryczne przeprowadzono dla  $T_{s0} = 1200^\circ\text{C}$ ,  $T_{a0} = 30^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 2 \times 12 \text{ s}$ , strumienia powietrza  $\dot{m}_a = 64,4 \text{ kg/h}$  oraz strumienia spalin  $\dot{m}_s = 68 \text{ kg/h}$ .

Otrzymane wyniki przedstawiają zarówno znaczne różnice w profilach temperaturowych wypełnienia i płynów, jak również duże różnice w temperaturach płynów na wylotach, które wynoszą  $118^\circ\text{C}$  dla powietrza i  $108^\circ\text{C}$  dla spalin.

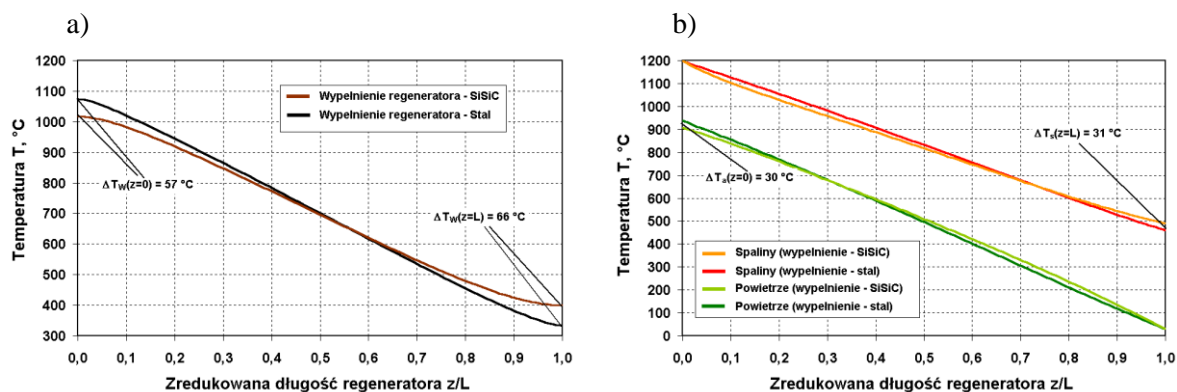
Na podstawie zaprezentowanego przykładu (rys. 4.16) należałoby stwierdzić, że różnice w uzyskiwanych wartościach temperatur, jak i w profilach temperaturowych dla modeli z i bez uwzględnienia wzdłużnego przepływu ciepła w materiale wypełnienia są na tyle duże, że pominięcie tego kierunku transportu ciepła może być powodem uzyskiwania błędnych wyników. Przy czym wpływ uwzględniania kierunku transportu ciepła uwidacznia się zasadniczo w materiałach charakteryzujących się dużymi współczynnikami przewodzenia ciepła. Dla materiałów o niewielkiej wartości tego współczynnika można przyjmować założenie upraszczające dotyczące pomijania

kierunku transportu ciepła w materiale zgodnego z kierunkiem przepływu płynów przez regenerator.



Rys. 4.16. Rozkład temperatury w kierunku współrzędnej „z” dla modelu z i bez uwzględnienia wzdłużnego przewodzenia ciepła w wypełnieniu: a) wypełnienie, b) płyny

Wykorzystując modelowanie numeryczne przeanalizowano również przypadki użycia dwóch różnych materiałów do wytworzenia wypełnienia regeneratora o konstrukcji i wymiarach zgodnych z tym, które badano eksperymentalnie. Jednym materiałem była stal o własnościach odpowiadających materiałowi używanemu podczas eksperymentów, a drugim ceramika SiSiC charakteryzująca się wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła [30]. W symulacji przyjęto temperatury płynów na wlotach  $1200^\circ\text{C}$  dla spalin i  $30^\circ\text{C}$  dla powietrza, natomiast strumienie płynów wynosiły 68 kg/h (spaliny) i 64,4 kg/h (powietrze). Rezultaty porównania obu materiałów zaprezentowano na rys. 4.17. Kryterium porównawczym była wartość temperatury podgrzewanego powietrza, która dla SiSiC wyniosła ok.  $905^\circ\text{C}$ , a dla stali była większa o ok.  $30^\circ\text{C}$ . Wypełnienie ze stali wychładza również spaliny do niższej temperatury w porównaniu z SiSiC.



Rys. 4.17. Rozkład temperatury w regeneratorsze (materiał SiSiC lub stal) w kierunku współrzędnej „z”: a) wypełnienie, b) płyny

Przedstawiony sposób porównywania można wykorzystać do wytypowania materiałów zastępczych lub do sprawdzenia przydatności danego materiału do budowy wypełnienia regeneratora. Ponadto należy rozważyć możliwość wystąpienia trudności związanych z zastosowaniem danego materiału do wytworzenia regeneratora, jak również należy mieć na uwadze odporność mechaniczną tego materiału, co jest niezmiernie ważne podczas obsługowego procesu czyszczenia regeneratora z osadów pyłowych, kiedy to istnieje duże prawdopodobieństwo jego uszkodzenia.

#### **4.6 Podsumowanie**

Obiektem analizy pracy był kompaktowy regenerator ciepła dla palników gazowych. Najważniejszym parametrem użytkowym tej konstrukcji jest temperatura podgrzewu powietrza spalania, jednakże nie jest ona prosta do wyznaczenia przy wykorzystaniu metod analitycznych, które w niektórych przypadkach nie sprawdzają się ze względu na przyjęte znaczące uproszczenia. Zatem należy zastosować metody numeryczne, które dodatkowo mogą dostarczyć o wiele więcej ważnych informacji z inżynierskiego punktu widzenia.

Na podstawie własnych prac badawczych powstał matematyczny model regeneratora ciepła, a następnie program komputerowy umożliwiający jego rozwiązanie z zastosowaniem techniki numerycznej opartej o metodę różnic skończonych. Podstawą obliczeń, przyjętą w programie, są równania bilansu energii dla fazy płynnej i stałej z wykorzystaniem tzw. metody bilansów elementarnych.

W ramach walidacji, matematycznego modelu działania regeneratora ciepła, przeprowadzono badania stanowiskowe na piecu kuziennym i przepływowej komorze grzewczej. Analiza otrzymanych wyników wykazała bardzo dobre dopasowanie modelu na poziomie różnicy do 2%, przy czym model prezentował wartości niższe w stosunku do pomiarowych, co jest pozytywnym efektem, gdyż zwyczajowo bywa odwrotnie. Rozbieżność pomiędzy wynikami modelowania numerycznego i eksperymentalnymi jest przypuszczalnie rezultatem braku pełnej informacji dotyczącej temperaturowej zależności właściwości materiału wypełnienia oraz zastosowania korelacji dla określania wartości współczynnika wnikania ciepła, której wynik (w przypadku szybkozmiennych pól temperatury) może być obarczony większym błędem.

W rezultacie zastosowania numerycznego modelowania działania palnikowego regeneratora ciepła otrzymano podstawową charakterystykę dynamiczną tej konstrukcji. Przedstawia ona temperaturę płynów i wypełnienia w fazie rozruchu działania regeneratora aż do uzyskania stanu pseudoustalonego - charakteryzującego się fluktuacją temperatury wypełnienia i przepływających mediów w ustabilizowanym zakresie (rys. 4.12). Przygotowane oprogramowanie, oprócz podstawowej charakterystyki dynamicznej, umożliwia dodatkowo uzyskanie innych form charakterystyk dynamicznych (rys. 4.13, rys. 4.14), które są mniej czytelne ze względu na zależność czasową, jednakże dostarczają również wielu cennych informacji.

Do programu komputerowego wprowadzono ponadto funkcjonalność przedstawienia bardzo nietypowej charakterystyki, która jest drobnym wycinkiem podstawowej charakterystyki dynamicznej w stanie pseudoustalonym. Charakterystyka ta prezentuje zależność temperaturową wypełnienia regeneracyjnego w okresie  $t_0$  działania regeneratora w postaci wykresu 3D (rys. 4.11).

W pracy przedstawiono wpływ uwzględniana w modelowaniu kierunków przewodzenia ciepła w materiale wypełnienia. Wykazano, że brak rozpatrywania wzdłużnego przewodzenia ciepła wprowadza błąd do otrzymanego wyniku, a szczególnie znaczący dla materiałów wypełnień cechujących się dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła ( $\text{SiSiC } \lambda = 150 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ). Różnice uzyskiwanej temperatury wyniosły  $118^\circ\text{C}$  dla podgrzewu powietrza i  $108^\circ\text{C}$  dla wychłodzenia spalin. Wyższe temperatury podgrzania otrzymuje się dla modeli, w których wzdłużny przepływ ciepła został pominięty. Zaobserwowano również wyraźną zmianę profilu temperatury wypełnienia, w którym odnotowano bardzo duże różnice, a największe na krańcach wypełnienia wynoszące  $174^\circ\text{C}$  i  $215^\circ\text{C}$  odpowiednio od strony dolotu spalin i powietrza (rys. 4.16).

Przygotowany matematyczny model działania regeneratora i zastosowanie go do numerycznych symulacji w programie komputerowym umożliwia sprawdzenie nowych konstrukcji wypełnienia regeneratora lub sprawdzenie przydatności materiału do celów budowy regeneratora w kontekście uzyskiwania bardzo wysokich temperatur podgrzewanego powietrza. W pracy zaprezentowano również porównanie dwóch wybranych materiałów ( $\text{SiSiC}$  i stali). W rezultacie uzyskano wyższą temperaturę podgrzewanego powietrza o  $30^\circ\text{C}$  dla regeneratora wykonanego z wysokotemperaturowej stali (rys. 4.17).

## Bibliografia

1. Tomeczek J., Góral J., Gradoń B.: The GAFT burner for reducing NO<sub>x</sub> in gas-fired high-temperature industrial furnaces. *Journal of the Institute of Energy*, 68 (1995), s. 178-183.
2. Suzukawa Y.: Heat transfer improvement and NO<sub>x</sub> reduction by highly preheated air combustion. *Energy Convers. Mgmt*, 38, 1997, No 10-13, p. 1061-1071.
3. Hasegawa T, Kishimoto S. Suzukawa Y.: Environmentally-compatible regenerative combustion heating system. *Industrial Heating*. 2000. vol. 67, no. 3, p. 111-118.
4. Fukushima S., Suzukawa Y., Akiyama T., Kato Y., Fujibayashi A., Tada T.: Eco-friendly regenerative burner heating system technology application and its future prospects. *NKK TECHNICAL REVIEW*. 2002. no. 87, p. 30-37.
5. Georgiew A., Wüning J.G., Bonnet U.: Regenerativbrenner für Doppel-P-Strahlheizrohre in einer Feuerverzinkungslinie. *Gaswärme International*. 2007. vol. 56, no. 6, p. 425-428.
6. Reusch G., Domagala J.: Efficient combustion systems for aluminium industry. In *Aluminium 2012: 9th World Trade Fair and Conference*. Düsseldorf, 2012, p. 39-44.
7. Tomeczek T., Wnęk M.: Regeneracyjne palniki gazowe dla pieców grzewczych wysokotemperaturowych. *Hutnik*, 9 (2005), s. 461-465.
8. Wnęk M.: Ceramic or metallic? - material aspects of compact heat regenerator energy efficiency. *Technologies and Properties of Modern Utilised Materials*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 35 (2012) 012022
9. Wnęk M.: The compact heat regenerator as a solution of fuel consumption reduction and CO<sub>2</sub> emission reduction. *Acta Metallurgica Slovaca Conference. Energy Transformations in Industry - 12th International Scientific Conference*. 21-23 September 2011, Low Tatras - Jasna pod Chopkom, p. 243-248
10. Rozpondek M., Wnęk M.: The application aspects of self-recuperative and self-regenerative burners in thermal devices. *Materials science and technology*, Web časopis MTF STU, [http://www.mtf.stuba.sk/docs//internetovy\\_casopis/2013/1/obsah1\\_2013.htm](http://www.mtf.stuba.sk/docs//internetovy_casopis/2013/1/obsah1_2013.htm), číslo 1, 2013, p. 20-26
11. Wnęk M., Rozpondek M.: Operating optimization of the heating furnaces. *Technical University in Košice. Energy Transformations in Industry - 14th International Scientific Conference*. 23-25 September 2015, Lubovnianske kupele – Stara Lubovna, ISBN:978-80-553-2202-5, p.162-167
12. Blasiak W.: Highly Preheated Air Combustion for Reducing of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. *Gospodarka Ciepłna i Eksploatacja Pieców Przemysłowych – VIII Ogólnopolska Konferencja Nauowo-Techniczna. Poraj k. Częstochowy 4-7.X 2000*, 17.

13. Wnęk M.: The regenerative burners as a significant way of CO<sub>2</sub> emission reduction. METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials. 23-25 May 2018, Brno, Czech Republic, EID: 2-s2.0-85059429391
14. M. Wnęk: Komputerowe wspomaganie doboru parametrów konstrukcyjnych regeneratora palnikowego. Materiały XXIII konferencji „Informatyka w technologii Metali”, Wisła 17-20 stycznia 2016, s. 22-23.
15. M. Wnęk: Dobór materiałów do budowy kompaktowego regeneratora ciepła dla ekonomicznych palników gazowych o niskiej emisyjności CO<sub>2</sub>. Hutnik, 1 (2018), s. 21-26.
16. Incropera F.P., De Witt D.P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons, USA 2002.
17. Schunk Ingenieurkeramik GmbH 02.94/1000 Ex
18. Tomeczek J., Nowak A.: Model matematyczny regeneratora ciepła z wypełnieniem kulistym. Tempus Workshop on Mathematical Modelling in Energy Systems and Processes. Karpacz, 19-24.06.1995, 315.
19. Guzik A.: Wpływ kształtu wypełnienia regeneratora na współczynnik przekazywania ciepła. ZN Pol. Śl., Energetyka z. 29, Gliwice 1968.
20. Szargut J., Składzień J.: Zastosowanie metody egzodus do obliczania periodycznie zmiennych pól temperatury. ZN Pol. Śl., Energetyka z. 50, Gliwice 1974.
21. Szargut J., Cofała J.: Liniowy model matematyczny przepływu ciepła w przeciwprądowym regeneratorze. Archiwum Hutnictwa, XXI (1976) 97.
22. Willmott A.J, Hinchcliffe C.: The effect of gas heat storage regenerator calculations. In. J. Heat Mass Transfer Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1977.
23. Hoffman J.D.: Numerical Methods for Engineers and Scientists. McGraw-Hill, New York 1992.
24. Von Rosenberg D.U.: Methods for the Numerical Solution of Partial Differential Equations. Elsevier, Amsterdam 1969.
25. Smith G.D.: Numerical Solution of Partial Differential Equations. Oxford University Press. London 1965. 19 (1976) 821.
26. Croft D., Lilley D.: Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations. Applied Science Publishers Ltd. London 1977.
27. Kostowski E.: Przepływ ciepła. WPS, Gliwice 2000.
28. Wnęk M.: The dynamic characteristics research of compact heat regenerator used in regenerative burners for metallurgical heating furnaces. Archives of Metallurgy and Materials. Volume 59, Issue 2, 2014. DOI: 10.2478/amm-2014-0137.7
29. Wnęk M.: Wykorzystanie ekwiwalentnej stałej czasowej w pomiarach szybkozmiennych temperatur w regeneratorze zintegrowanym z palnikiem gazowym. Pomiary Automatyka Kontrola, vol.58, nr 5/2012, s. 435-438



30. Bittner H.G., Berroth K., Weber H., Binder O.: Feinstrukturierte Wärmetauscher – komponenten aus SiSiC mit großer Wärmetauscherflasche. Gaswärme International, 43 (1994), April, p. 159-164

## List of figures

- Fig. 4.1. Regenerative burners: a) attached regenerators, b) integrated regenerator
- Fig. 4.2. Regenerator temperature characteristics with pointed operating phases
- Fig. 4.3. Dynamic characteristics of regenerator
- Fig. 4.4. Test stand of the heat regenerator - forge furnace
- Fig. 4.5. Stand for testing the dynamic characteristics of regenerator
- Fig. 4.6. Types of regenerator filling: a) ball, b) honeycomb, c) sunflower
- Fig. 4.7. Construction parameters of the regenerator filling: a) honeycomb, b) sunflower
- Fig. 4.8. Plate model replacement the sunflower countercurrent regenerator
- Fig. 4.9. Regenerator phases based on the measured temperature course for  $z = L$
- Fig. 4.10. "User window" of a computer program to simulate regenerator operation
- Fig. 4.11. 3D graph of the regenerator filling temperature field in the author's program to simulate regenerator operation
- Fig. 4.12. Regenerator start-up characteristics - experimental and simulation tests
- Fig. 4.13. The distribution of temperature in the filling in the direction of the "z" coordinate at different times
- Fig. 4.14. The distribution of temperature in the filling for  $z = L$  in the direction of the "x" coordinate at various times of the regenerator period
- Fig. 4.15. Comparison the numerical modeling and experiment
- Fig. 4.16. Temperature distribution in the "z" direction coordinate for the model with and without taking into account the longitudinal heat conduction in the filling: a) filling, b) liquids
- Fig. 4.17. Temperature distribution in the regenerator (SiSiC material or steel) in the "z" direction: a) filling, b) liquids

Marek TKOCZ<sup>1</sup>

## **Rozdział 5**

# **MODELOWANIE PROCESÓW PRZERÓBKI PLASTYCZNEJ**

### **5.1. Wstęp**

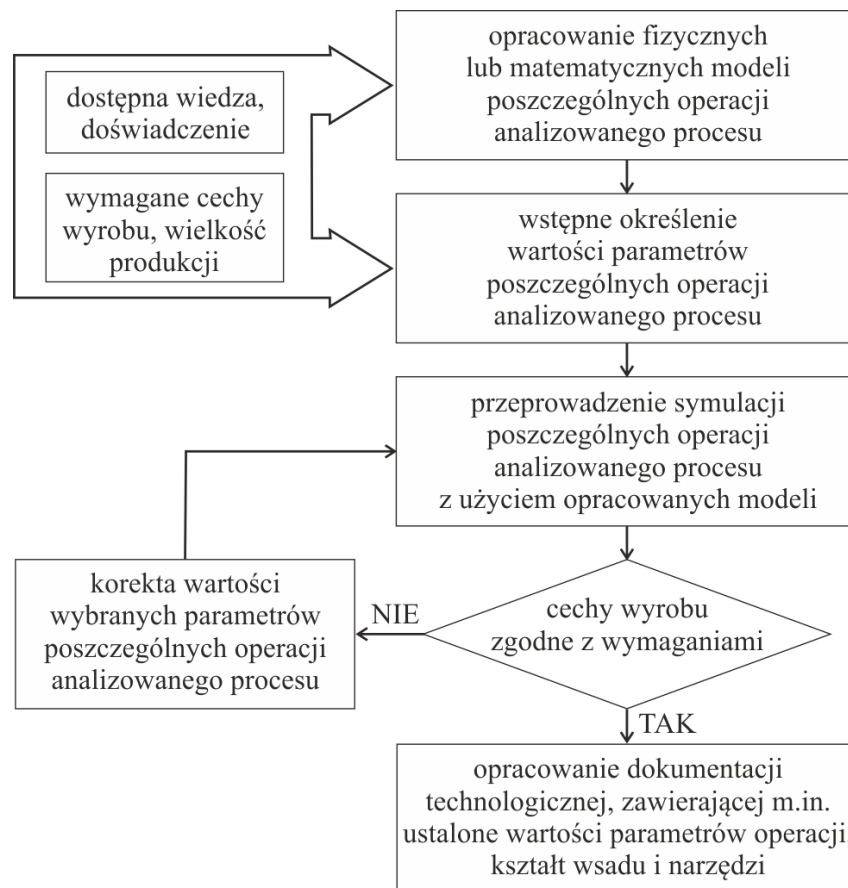
Wysoki stopień automatyzacji współczesnych urządzeń, gniazd oraz linii produkcyjnych stosowanych do realizacji rozmaitych procesów przeróbki plastycznej i obróbki cieplno-plastycznej daje możliwość precyzyjnego sterowania i utrzymywania założonych parametrów technologicznych w ściśle określonych zakresach. Pozwala to na powtarzalne i uzasadnione ekonomicznie wytwarzanie wyrobów, którym nadaje się nie tylko wymagany kształt, ale również odpowiednią strukturę, determinującą ich właściwości użytkowe. Określenie dopuszczalnych zakresów parametrów procesu odbywa się na etapie projektowania i wymaga uwzględnienia wszystkich zjawisk fizycznych i przemian chemicznych zachodzących w trakcie poszczególnych operacji.

W przypadku dobrze rozpoznanych, konwencjonalnych procesów wytwarzania, dobór parametrów operacji, urządzeń czy też rodzaju i kształtu narzędzi dokonywany jest często na podstawie zaleceń i zależności analitycznych zgromadzonych w normach lub poradnikach technologicznych oraz na podstawie doświadczenia zdobytego podczas wcześniej realizowanych procesów wytwarzania podobnych wyrobów. Podczas projektowania nowych, złożonych lub niekonwencjonalnych procesów, stosowanie uogólnionych zaleceń oraz wzorów analitycznych ma jednak charakter jedynie orientacyjny i jest zazwyczaj niewystarczające. Bardzo często nie można również przeprowadzić odpowiednich prób bezpośrednio na urządzeniach stosowanych w procesie produkcyjnym, ze względu na wysokie koszty oraz duże ryzyko związane z bezpieczeństwem czy też uszkodzeniem urządzeń. Racjonalną alternatywą w takich przypadkach jest przeprowadzenie modelowania fizycznego lub matematycznego

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Katedra Zaawansowanych Materiałów i Technologii

projektowanego procesu, zgodnie z procedurą przedstawioną na rysunku 5.1. Dostępna wiedza oraz doświadczenie stanowią podstawę do opracowania modeli poszczególnych operacji technologicznych analizowanego procesu oraz ustalenia zakresu dopuszczalnych wartości parametrów kolejnych operacji, mając na uwadze wymagane cechy wyrobu, wielkość produkcji, dostępne urządzenia itp. Przeprowadzenie eksperymentów lub symulacji poszczególnych operacji z użyciem opracowanych modeli pozwala m.in. na sprawdzenie możliwości wytworzenia wyrobu zgodnie z wymaganiami, porównanie alternatywnych wariantów, dobór odpowiednich urządzeń i narzędzi, analizę zużycia narzędzi i energochłonności procesu, zawężenie zakresu wartości parametrów operacji, jak również ich optymalizację.



Rys. 5.1. Uogólniona procedura wykorzystania matematycznego lub fizycznego modelowania w projektowaniu procesu wytwarzania

Model, który ma być użyty do projektowania określonej operacji technologicznej, musi spełnić zazwyczaj kilka ustalonych kryteriów. Przede wszystkim powinien poprawnie odzwierciedlać te warunki prowadzenia operacji, które mają istotny wpływ na analizowane parametry wynikowe. Musi również oferować wystarczającą dla założonego celu dokładność wyników, natomiast szybkość działania algorytmu

obliczeń lub czas przygotowania i przeprowadzenia eksperymentu musi pozwolić na wykonanie jedno- lub wielowariantowej symulacji w czasie umożliwiającym wykorzystanie wyników w procedurach projektowania bądź sterowania procesem technologicznym, czy też podejmowania decyzji odnośnie jego dalszego przebiegu. O wyborze metody modelowania decydują również aspekty ekonomiczne.

W dalszej części rozdziału krótko scharakteryzowano te metody modelowania, które są najpowszechniej wykorzystywane do projektowania i analizy procesów przeróbki plastycznej i obróbki cieplno-plastycznej. Przedstawiono również przykłady wykorzystania modelowania do rozwiązywania konkretnych problemów naukowych i inżynierskich, których autorami bądź współautorami są byli lub obecni pracownicy i studenci Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej.

## **5.2. Metody modelowania procesów przeróbki plastycznej**

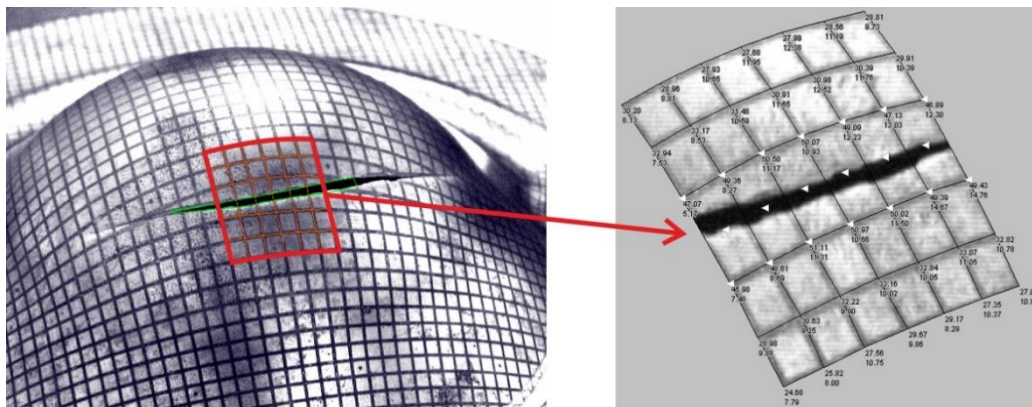
### **Modelowanie fizyczne**

Modelowanie fizyczne operacji technologicznej polega na przeprowadzeniu prób doświadczalnych na odpowiednio przygotowanym fizycznym modelu, który jest uproszczonym odzwierciedleniem tej operacji, złożonym jedynie z takich elementów i uwzględniającym tylko te zjawiska zachodzące w rzeczywistych warunkach, które są istotne z punktu widzenia celu badań. Z uwagi na koszty, modelowanie fizyczne procesów przeróbki plastycznej najczęściej przeprowadza się w skali pomniejszonej, przy czym może być wykorzystany materiał stosowany w procesie rzeczywistym lub materiał modelowy, np. plastelina, wosk, ołów, różnego rodzaju żywice itp. Wykonuje się również próbki składane z materiałów o różnych charakterystykach plastyczności (np. w celu zamodelowania gradientu temperatury) lub z materiałów o różnych kolorach (w celu ułatwienia analizy plastycznego płynięcia i rozkładu odkształcenia). Badania odkształceń i naprężeń występujących podczas odkształcenia plastycznego mogą być również prowadzone na modelach, na których nakłada się optycznie czułą warstwę żywicy epoksydowej i oświetla wiązką światła spolaryzowanego. Warstwa ta pod obciążeniem wykazuje tzw. "dwójłomność wymuszoną" i odkształca się identycznie jak powierzchnia badanego modelu, a otrzymany układ prążków odpowiada rozkładowi naprężenia na analizowanej powierzchni [1].

Model fizyczny musi spełniać określone kryteria podobieństwa do modelowanej operacji, by można było odnieść wyniki modelowania do analizy zjawisk zachodzących

w procesie rzeczywistym. Kryteria te dotyczą w szczególności podobieństwa geometrii obiektu rzeczywistego i modelu, podobieństwa warunków prowadzenia procesu rzeczywistego i eksperymentu oraz podobieństwa właściwości fizycznych i charakterystyk plastyczności materiału kształtowanego w analizowanym procesie i materiału modelowego [1]. Przykładowo, Pater i in. [2] przeprowadzili modelowanie fizyczne procesu walcowania śrubowego na gorąco stalowych kul na walcach laboratoryjnej z narzędziami wykonanymi z tworzywa ABS i modelem wsadu z plasteliny [2]. Przed eksperymentem model ochłodzono do 5°C, gdyż podczas wcześniejszych badań stwierdzono, że w tej temperaturze charakterystyki plastyczności i pęknięcia zastosowanej plasteliny są najbardziej zbliżone do charakterystyk stali C60 w warunkach kształtowania na gorąco. W modelu uwzględniono kryteria podobieństwa geometrycznego wsadu i walców (zastosowano skalę 1:2) oraz warunków kontaktu (zastosowano olej teflonowy, aby warunki tarcia w układzie plastelina - tworzywo ABS były zbliżone do tych występujących w rzeczywistym procesie śrubowego walcowania na gorąco kul stalowych, gdzie żadnego smaru nie używa się).

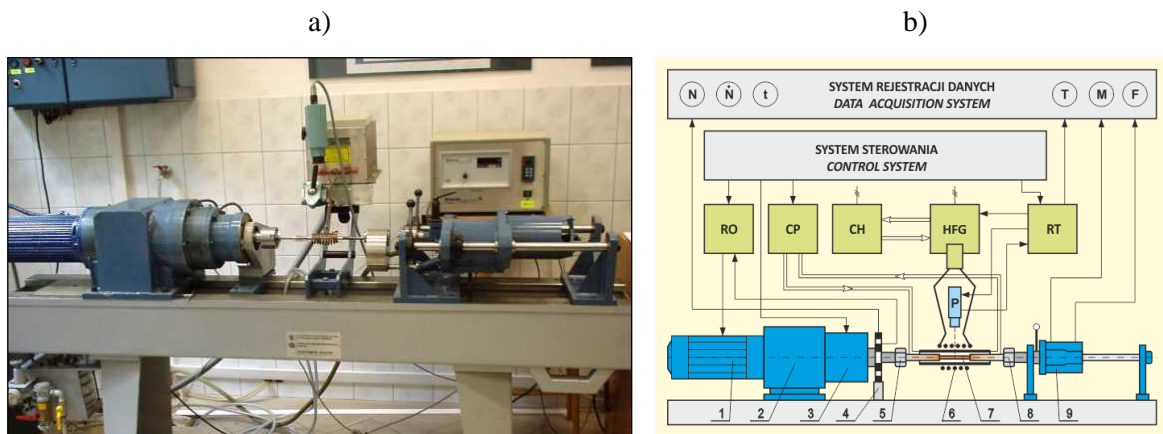
Za pomocą modelowania fizycznego prowadzonego z uwzględnieniem kryterium podobieństwa geometrycznego można określić wpływ wartości parametrów procesu m.in. na charakter plastycznego płynięcia i zmiany kształtu przerabianego materiału, dokładność wymiarów, powstawanie pęknięć bądź innych wad, parametry siłowo-energetyczne procesu lub rozkład odkształcenia - w przypadku wykorzystania próbek składanych lub próbek z naniesioną na ich powierzchni siatką podziałową (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Lokalne wartości odkształceń głównych w wybranym obszarze wybrzuszonej blaszanej próbki, obliczone na podstawie deformacji kwadratowej siatki podziałowej

Innym sposobem modelowania fizycznego procesu przeróbki plastycznej lub obróbki cieplno-plastycznej są eksperymenty polegające na ściskaniu lub skręcaniu próbek wykonanych z materiału stosowanego w analizowanym procesie oraz w zakresach temperatury, odkształcenia i prędkości odkształcenia występujących

w badanym procesie, zaniehbując przy tym podobieństwo geometryczne próbek i narzędzi kształtujących. Modelowanie fizyczne tego typu można prowadzić na urządzeniach do badań plastometrycznych, tj. plastometr skręcający (rys. 5.3), plastometr krzywkowy czy dylatometr odkształceniowy. Ostatnio coraz częściej stosowane są zaawansowane symulatory termomechaniczne, wśród których prym wiodą urządzenia Gleeble, wyposażone w wymienne komory badawcze z różnymi zestawami narzędzi, układami mechanicznymi, układami nagrzewania, chłodzenia, wytwarzania atmosfery ochronnej czy próżni [3]. Wymienione urządzenia badawcze umożliwiają przeprowadzenie symulacji odwzorowujących zjawiska zachodzące w materiale podczas nagrzewania, odkształcania ciągłego lub sekwencyjnego oraz chłodzenia w warunkach określonego procesu technologicznego [4]. Dzięki tego typu eksperymentom można niewielkim kosztem uzyskać cenne informacje dotyczące wpływu zastosowanych parametrów kształtowania i obróbki cieplno-plastycznej na parametry siłowo-energetyczne procesu, jak również na zmiany w mikrostrukturze materiału.



Rys. 5.3. Widok (a) i schemat ideowy (b) plastometru skręcającego na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, 1-silnik, 2-przekładnia, 3-zespół sprzęgła i hamulca, 4-impulsator, 5-ruchomy uchwyt próbki, 6-wzbudnik indukcyjny, 7-próbka, 8-nieruchomy uchwyt próbki, 9-głowica pomiarowa, P-pirometr, RO-regulator obrotów, CP-układ chłodzenia próbki, CH-chłodnica, HFG-generator wysokiej częstotliwości, RT-regulator temperatury

Najbardziej zaawansowaną formą modelowania fizycznego procesów przeróbki plastycznej lub obróbki cieplno-plastycznej są eksperymenty prowadzone w laboratoryjnych gniazdach lub liniach produkcyjnych, grupujących opomiarowane urządzenia stosowane do następujących po sobie operacji technologicznych. Linie walcownicze tego typu znajdują się np. w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Metalurgii Żelaza [5], w TU Ostrava [6] oraz w TU Bergakademie Freiberg [7]. W stosunku do przedstawionych wcześniej metod modelowania, pozwalają one na dokładniejsze odwzorowanie warunków analizowanych procesów przemysłowych,

zachowując przy tym podobieństwo geometryczne przerabianego materiału i narzędzi. Są przy tym stosunkowo łatwo przezbrajalne, zatem koszty utrzymania takich linii oraz koszty modelowania fizycznego są znacznie niższe niż koszty prób w gniazdach lub liniach przemysłowych, dostosowanych zwykle do seryjnej i masowej produkcji.

Stosując różne sposoby modelowania fizycznego uzyskuje się zestaw wyników, który można z powodzeniem wykorzystać podczas projektowania i optymalizacji analizowanego procesu technologicznego, jak również do przygotowania oraz weryfikacji wyników modelowania matematycznego.

### **Modelowanie matematyczne**

Dynamiczny rozwój elektroniki i komputeryzacji, a przede wszystkim wzrost mocy obliczeniowej komputerów, który dokonuje się w ostatnich dziesięcioleciach, powoduje, że do projektowania procesów technologicznych wykorzystuje się coraz częściej zaawansowane, matematyczne metody modelowania. Modelowanie matematyczne operacji technologicznej polega na przeprowadzeniu symulacji jej przebiegu, wykorzystując model zawierający matematyczny opis zachodzących w jej trakcie zjawisk i przemian, które są istotne z punktu widzenia celu badań. Modelowanie matematyczne może być przeprowadzane w sposób analityczny bądź z zastosowaniem metod numerycznych.

Stopień skomplikowania równań teorii plastyczności, występujące nieliniowości związane ze złożonym kształtem fizycznej kotliny odkształcenia i zmiennym przebiegiem zmian naprężenia uplastyczniającego metali w funkcji odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury powodują, że analityczne metody rozwiązywania problemów w zakresie przeróbki plastycznej (np. metoda różniczkowych równań równowagi, metoda linii poślizgu czy metody energetyczne [8]) wymagają przyjęcia daleko idących uproszczeń, np. założenia, że odkształcenie plastyczne nie rozprzestrzenia się poza geometryczną kotlinę odkształcenia oraz że poszczególne przekroje w trakcie odkształcania pozostają płaskie, tzn. składowa prędkości odkształcenia w kierunku prostopadłym do rozpatrywanego przekroju jest identyczna na całym przekroju. W skrajnym przypadku składowa ta jest równa zero, więc analiza prowadzona jest wtedy w płaskim stanie odkształcenia. W wielu przypadkach uzyskane wyniki trudno zatem odnieść do rzeczywistych warunków przebiegu procesu, zatem ich zastosowanie do projektowania procesów technologicznych jest mocno ograniczone.

Spośród różnych metod numerycznych (tj. metoda elementów skończonych – MES), metoda różnic skończonych, metoda elementów brzegowych, metoda objętości

skończonych), pierwsza z wymienionych jest obecnie najczęściej wykorzystywana w programach symulacyjnych do analizy procesów przeróbki plastycznej i obróbki cieplno-plastycznej. Stopień zaawansowania tych programów ma silny związek z rozwojem techniki komputerowej. W latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych moce obliczeniowe procesorów pozwalały na przeprowadzenie obliczeń numerycznych w rozsądnym czasie jedynie w dwóch wymiarach, czyli dla wybranego przekroju. Dwuwymiarowe rozwiązanie w zupełności wystarcza do określenia stanów termomechanicznych i parametrów siłowo-energetycznych w procesach osiowosymetrycznych (np. wyciskanie prętów o przekroju kołowym, kucie matrycowe odkuwek osiowosymetrycznych) oraz przebiegających w płaskim stanie odkształcenia (np. walcowanie blach). W przypadku procesów, w których występuje przestrzenny stan odkształcenia, dwuwymiarowa analiza obciążona jest pewnym błędem związanym z przyjęciem założenia płaskości przekroju. Pierwsze, proste modele trójwymiarowe MES, w których objętość wsadu dzielona była jedynie na kilkadziesiąt elementów, przedstawiono w połowie lat osiemdziesiątych. Wraz z postępem technologii informatycznej zaczęto korzystać z bardziej zaawansowanych programów. Obecnie, oprócz wielu akademickich programów symulacyjnych wyspecjalizowanych pod kątem procesów przeróbki plastycznej i obróbki cieplno-plastycznej, dostępnych jest co najmniej kilkanaście stale rozwijanych komercyjnych programów tego typu, używanych często przez renomowanych producentów wyrobów przerabianych plastycznie. Wśród nich wyróżnić można programy Stampack, AutoForm, Pam-Stamp, Dynaform - przeznaczone do symulacji procesów kształtowania wyrobów z blach i rur (tj. tłoczenie, hydroforming); Forge, Deform, QForm, Simufact Forming, FormFEM – programy umożliwiające symulację różnych procesów przeróbki plastycznej i cieplno-plastycznej oraz Abaqus, Ansys, LS-Dyna – wielozadaniowe programy pozwalające również na prowadzenie symulacji kształtowania plastycznego.

Procedura przeprowadzania symulacji numerycznej w programie MES składa się generalnie z trzech etapów: preprocessingu (przygotowania modelu symulacji), obliczeń numerycznych i postprocessingu (przetwarzania i wizualizacji wyników).

W przypadku modelowania procesów przeróbki plastycznej preprocessing obejmuje wygenerowanie lub import geometrii wsadu i narzędzi, podzielenie ich na skończoną ilość elementów połączonych ze sobą w węzłach, zdefiniowanie położenia odkształcanego materiału względem narzędzi, zdefiniowanie ruchu narzędzi, zdefiniowanie charakterystyk plastyczności materiału (przede wszystkim funkcji naprężenia uplastyczniającego) i fizycznych materiału, zdefiniowanie warunków brzegowych (tarcia i wymiany ciepła) oraz ustawienie parametrów aktualizacji siatki,



kroku czasowego, częstości zapisu wyników i innych parametrów związanych z metodą elementów skończonych.

Obliczenia numeryczne dokonywane są automatycznie. Istnieje zazwyczaj możliwość wyboru "solvera" adekwatnie do założonego modelu odkształcanego ciała. Przyjęcie sprężysto-plastycznego modelu odkształcanego ciała w metodzie elementów skończonych stwarza wiele trudności, wymaga bowiem obliczenia przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w zakresie sprężystym oraz sprawdzenia, czy dany element, wcześniej sprężysty, osiągnął stan plastycznego płynięcia. Nie można też operować dużymi przyrostami odkształceń. Tymczasem podczas przeróbki plastycznej na gorąco odkształcenia sprężyste są pomijalnie małe w stosunku do odkształceń plastycznych.

Z tego względu w przypadku procesów przeróbki plastycznej na gorąco wykorzystuje się zwykle sztywno-plastyczny lub sztywno-lepkoplastyczny (uwzględniający wpływ prędkości odkształcenia) model odkształcanego ciała. Daje to możliwość analizowania dużych odkształceń plastycznych oraz skrócenie czasu obliczeń.

Rozwiązanie zadania sprowadza się do wyznaczenia pola prędkości spełniającego warunek minimum funkcjonału wyrażającego całkowitą moc odkształcenia plastycznego dla przyjętych warunków brzegowych. Funkcjonał dla całej objętości jest sumą funkcjonałów wyznaczonych dla poszczególnych elementów. Obejmuje on składniki wyrażające pracę związaną z odkształceniem plastycznym, wymuszeniem zasady zachowania stałej objętości, działaniem sił zewnętrznych i działaniem sił tarcia na powierzchni kontaktu materiału z narzędziami. Pole prędkości wyznaczone jest w sposób iteracyjny w każdym elemencie siatki. Obliczenia prowadzone są do momentu, w którym ustalona norma rozwiązania będzie mniejsza od pewnej zadanej dokładności rozwiązania. Na podstawie wyznaczonego pola prędkości obliczane są następnie parametry charakteryzujące zmianę stanu mechanicznego w objętości kształtowanego materiału i parametry siłowo-energetyczne procesu. W celu obliczenia zmian i rozkładu temperatury, program obliczeniowy uwzględnia różnego rodzaju zjawiska cieplne w analizowanym układzie, tj. ochładzanie przerabianego materiału wskutek promieniowania, konwekcji i przewodzenia oraz generowanie ciepła w materiale wskutek pracy odkształcenia plastycznego i występowania sił tarcia [9,10]. Coraz częściej w programach do symulacji MES procesów przeróbki plastycznej i cieplno-plastycznej implementowane są modele pozwalające na analizę zjawisk mikrostrukturalnych, tj. przemiany fazowe, zmiany wielkości ziarna itp. [11].

Postprocessing polega na przetworzeniu wyników symulacji numerycznych na postać wygodną do późniejszej analizy. Wyniki te mogą być przedstawiane w formie

map rozkładu wybranych parametrów, animacji przestrzennych bądź w formie wykresów. Mapy rozkładów wybranych parametrów mogą być tworzone zarówno na powierzchni kształtowanego materiału jak i na dowolnie usytuowanym przekroju, w dowolnym momencie operacji.

Projektowanie i analiza procesów przeróbki plastycznej wymaga często uwzględnienia wpływu zjawisk zachodzących równocześnie w bardzo różnych skalach wymiarowych. Rozwój modelowania matematycznego zmierza więc w kierunku coraz powszechniejszego zastosowania metod wieloskalowych, takich jak np. metoda CAFE, która stanowi połączenie dwóch technik obliczeniowych: automatów komórkowych (CA) do rozwiązywania zagadnień w skali mikro oraz elementów skończonych (FE) – do obliczeń w skali makro [12, 13]. Dodatkowe możliwości stwarzają również metody cyfrowej reprezentacji obrazu (Digital Material Representation - DMR), których ideą jest rozpatrywanie w formie jawnej każdej istotnej cechy mikrostruktury, np. zróżnicowanych kształtów ziarn, faz, wtrąceń czy wydzielen w trakcie symulacji numerycznych procesów kształtowania plastycznego [14, 15]. Szyndler i in., bazując na obrazach EBSD, wygenerowali przestrzenny model DMR, który pozwolił na uwzględnienie wpływu orientacji krystalograficznej na odkształcenie i umocnienie ziaren aluminium podczas niekonwencjonalnego procesu kucia podzielonym na segmenty stemplem [16]. Do symulacji procesu w skali mikro wykorzystano metodę plastyczności kryształu (CP), a w skali makro – metodę elementów skończonych. Madej i in. opracowali algorytm do przygotowania przestrzennych modeli DMR materiałów porowatych, korzystając z obrazów mikrostruktury otrzymanych metodą zgłądów równoległych [17]. Modele te zostaną wykorzystane do symulacji procesu zagęszczania spieków metodami przeróbki plastycznej. Z kolei Saby i in. wyniki makroskopowych symulacji walcowania na gorąco prowadzonych dla modelowego pasma bez nieciągłości wykorzystali do zdefiniowania warunków brzegowych w modelu opracowanym na poziomie skali mezo, w którym zastosowano prostopadłościenny reprezentatywny element objętościowy (RVE) z pustką o geometrii odzwierciedlającej kształt rzeczywistej nieciągłości, wygenerowaną na bazie przestrzennego obrazu uzyskanego metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej [18].

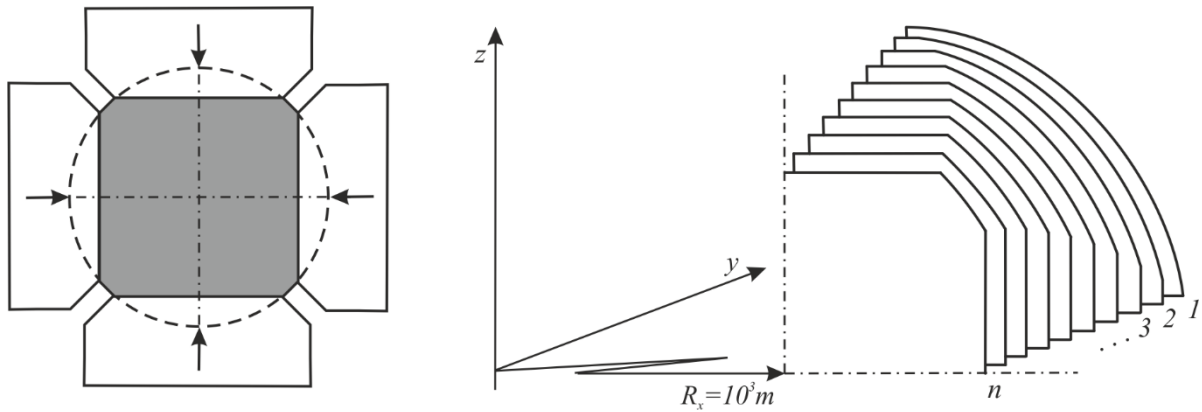
### 5.3. Przykłady modelowania procesów przeróbki plastycznej

#### Modelowanie operacji kucia w kowarce

Przykładem komplementarnego zastosowania modelowania fizycznego oraz matematycznego do projektowania procesu przeróbki plastycznej są prace Grosmana i Pieli dotyczące analizy wstępnego przerobu stali narzędziowych w kowarkach [19, 20, 21]. Modelowanie fizyczne tego procesu było realizowane w warunkach rzeczywistego procesu produkcyjnego. Jako materiał modelowy zastosowano próbki składane, wykonane z pręcisk ze stali w gatunku 35, w których osadzono - równoległe do osi wzdłużnej - sworznie o przekroju kołowym ze stali H25T. Materiały dobrano w taki sposób, aby różniły się odpornością na działanie środków trawiących, ale spełniały jednocześnie kryterium zbliżonych wartości naprężenia uplastyczniającego. Pomiary zmian cech geometrycznych odkształconych sworzni, dokonane na wytrawionej powierzchni przekroju poprzecznego odkutego pręta, umożliwiły wyznaczenie rozkładu lokalnych odkształceń (rys. 5.5 a).

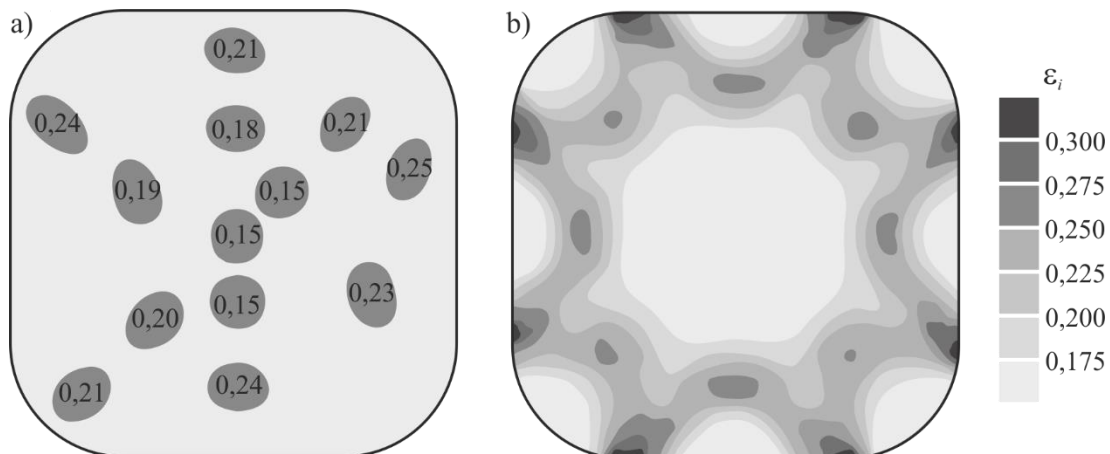
Na podstawie analizy danych z przeprowadzonych eksperymentów opracowano model numeryczny do symulacji procesu kucia prętów w kowarkach. Z uwagi na niewielką moc obliczeniową komputerów z początku lat dziewięćdziesiątych, ówczesne komercyjne programy MES (m.in. zastosowany w opisywanym przypadku program Forge 2) umożliwiały prowadzenie obliczeń w przestrzeni dwuwymiarowej, były więc użyteczne głównie przy rozwiązywaniu zagadnień osiowosymetrycznych oraz procesów, w których występuje płaski stan odkształcenia (np. walcowanie blach).

W przytoczonym przykładzie, aby obejść niedogodność związaną z brakiem możliwości przeprowadzenia symulacji w przestrzeni 3D, zastosowano tzw. metodę torusa, myślowo zastępując prostoliniowy pręt pierścieniem o bardzo dużym promieniu (rzędu  $10^3$  m) w stosunku do wymiarów przekroju poprzecznego pręta (rzędu kilkudziesięciu do kilkuset milimetrów). Przyjęcie takiego założenia spowodowało, że ugięcie osi było pomijalnie małe i nie miało wpływu na poprawność wyników symulacji. Wyodrębniono też kolejne przekroje poprzeczne wzdłuż kotliny odkształcenia (rys. 5.4), dla których przeprowadzono kolejne symulacje w przestrzeni 2D z uwzględnieniem historii odkształcenia z symulacji poprzednich.



Rys. 5.4. Sposób ustalania cech geometrycznych dwuwymiarowych modeli do symulacji MES kucia w kowarce z zastosowaniem kalibrowania koło-kwadrat (1,2,3 ...  $n$  – kształty kolejnych przekrojów) [20]

Obliczenia przeprowadzono dla różnych wariantów procesu kucia. Symulacje pozwoliły na wyznaczenie rozkładów intensywności odkształceń lokalnych (rys. 5.5 b), prędkości odkształcenia, naprężenia, prędkości przemieszczeń metalu, temperatury pasma, jak również obliczenie siły kucia. Mimo zastosowanych uproszczeń, uzyskane wyniki wykazały dużą zgodność z rezultatami modelowania fizycznego, a wyznaczona w obliczeniach numerycznych charakterystyka stanu termomechanicznego stworzyła podstawy racjonalnego doboru typu kowarki, kształtu i liczby kowadeł, sposobu podawania materiału oraz parametrów technologicznych kucia w kowarkach, w celu zaprojektowania technologicznie bezpiecznego procesu umożliwiającego efektywny wstępny przerób kutej materiału.

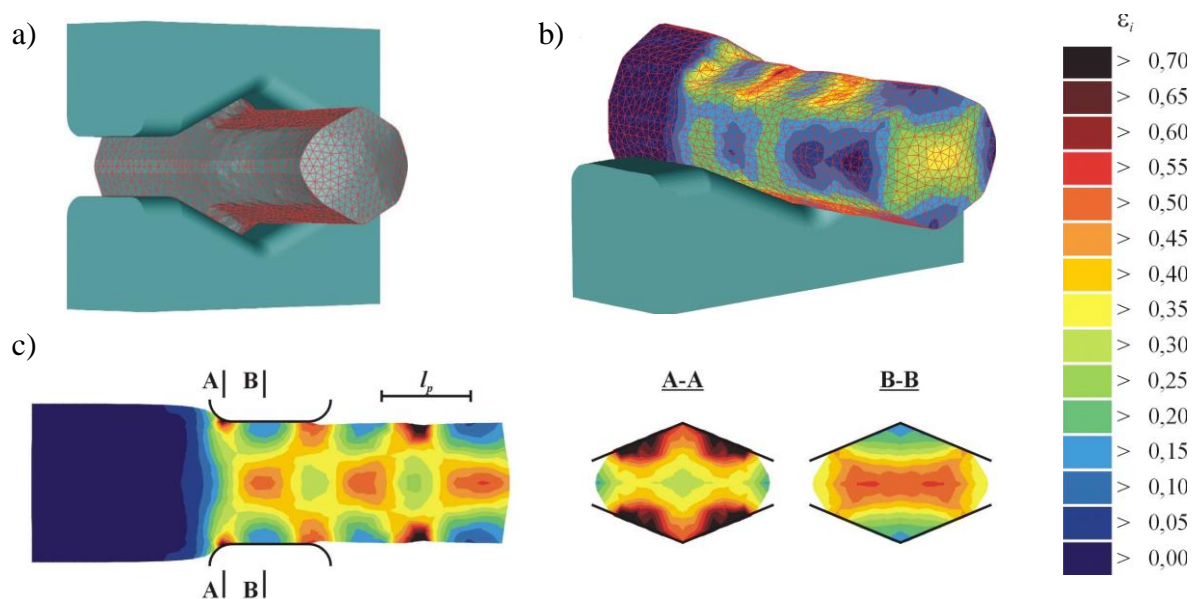


Rys. 5.5. Porównanie wyników modelowania fizycznego (a) i symulacji MES (b) procesu kucia na kowarce (rozkład odkształcenia fizycznego w przecie kutym z zastosowaniem kalibrowania koło-kwadrat) [20]

## Modelowanie operacji kucia wydłużającego na prasie hydraulicznej

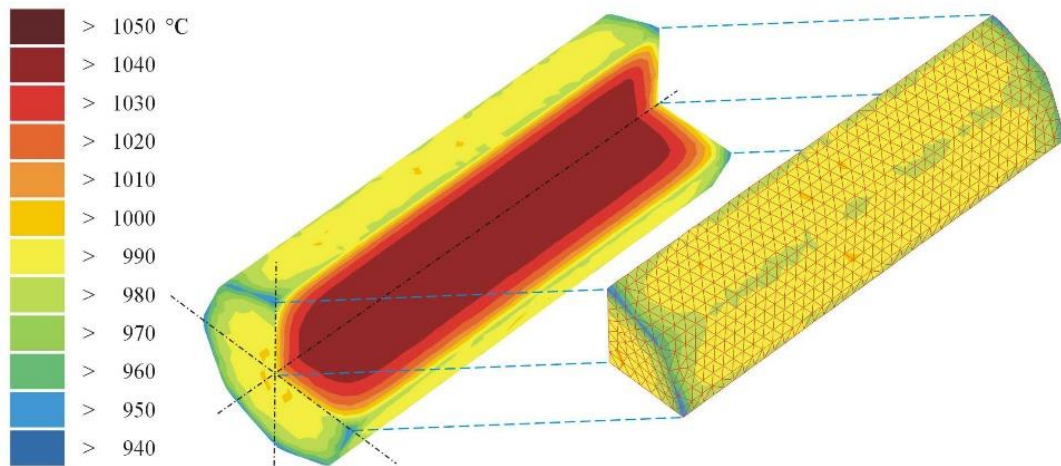
Kucie wydłużające prętów o dużych przekrojach prowadzone jest zazwyczaj na prasach wyposażonych w kowadła płaskie. Powszechność tego typu narzędzi sprawiła, że zasady doboru parametrów technologicznych w tym przypadku są dobrze poznane. Wydłużanie w kowadłach płaskich wiąże się jednak z powstaniem stref, w których odkształcenie następuje w wyniku działania naprężeń rozciągających. W przypadku stali wysokostopowych, cechujących się małą plastycznością, prowadzi to często do powstawania pęknięć. Ograniczenie wielkości tych stref i zwiększenie udziału naprężeń ściskających w objętości wsadu można osiągnąć poprzez wytworzenie bocznego nacisku na odkształcany materiał za pomocą kowadeł kształtowych. Cechy geometryczne kowadeł kształtowych narzucają jednak pewne ograniczenia, wymagane jest zatem ustalenie planów kucia adekwatnych do zastosowanego zestawu narzędzi.

W celu opracowania technologii wytwarzania prętów o dużych średnicach z ledeburytycznych stali narzędziowych przeprowadzono wielowariantową symulację MES procesu kucia wydłużającego w kowadłach romboidalnych o kącie rozwarcia wykroju  $135^\circ$  (rys. 5.6). W tym przypadku wykorzystano już nowszą wersję programu Forge, umożliwiającą prowadzenie obliczeń w przestrzeni 3D, co znacznie usprawniło przygotowanie modeli symulacyjnych, które zbudowano w oparciu o dane zebrane podczas przemysłowego procesu kucia wydłużającego na prasie hydraulicznej o maksymalnym nacisku 20 MN [22].

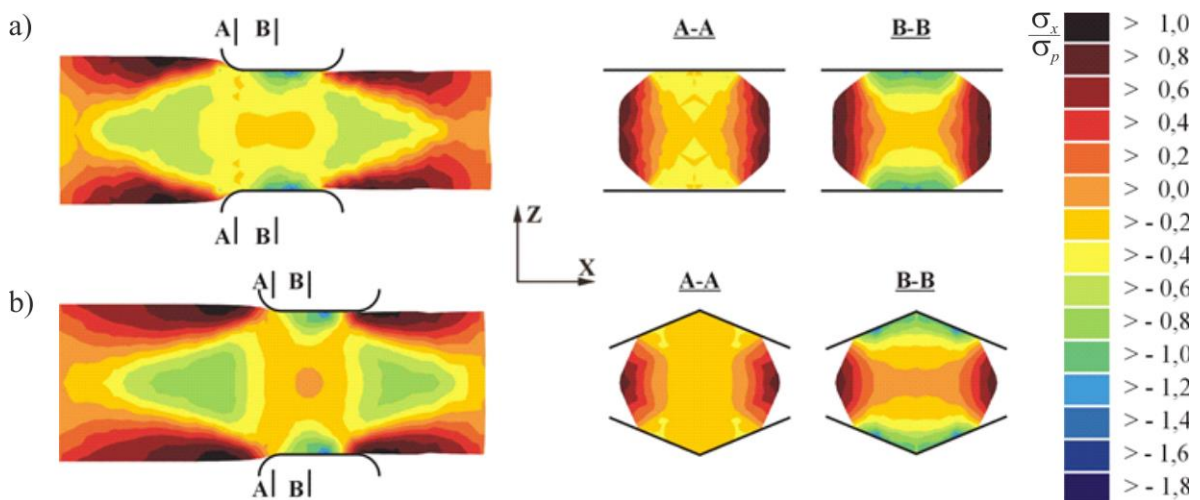


Rys. 5.6. Rozkład odkształcenia zastępczego na powierzchni i wybranych przekrojach pręta wydłużanego w kowadłach romboidalnych [22]

Z uwagi na wąski zakres temperatury kucia badanej stali szczególną uwagę zwracano na aspekty związane ze zjawiskami wymiany ciepła przed i w trakcie procesu kucia (rys. 5.7). W celu określenia zasadności stosowania kowadeł kształtowych w analizowanym procesie, skonfrontowano wyniki symulacji prowadzonych dla kowadeł rombówkich i płaskich. Porównano warianty, które wymagały zastosowania podobnej siły nacisku - ok. 19 MN (rys. 5.8). Wyniki symulacji wskazały znaczne zmniejszenie stref występowania niekorzystnych naprężeń rozciągających w przypadku zastosowania kowadeł rombówkich. Na bazie wyników przeprowadzonych badań opracowano algorytm pozwalający na opracowanie planu kucia wydłużającego w analizowanych kowadłach, uwzględniający sformułowane zasady doboru racjonalnych wartości parametrów procesu [23].



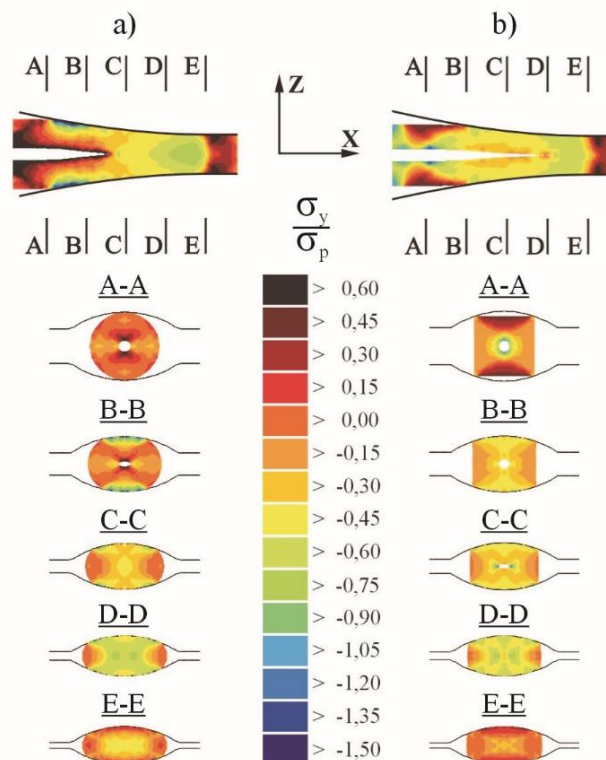
Rys. 5.7. Rozkład temperatury wlewka wskutek transportu z pieca do prasy [22]



Rys. 5.8. Rozkłady wzdłużnej składowej naprężenia odniesionej do naprężenia uplastyczniającego na wybranych przekrojach pręta stalowego, wydłużanego w kowadłach płaskich (a) i w kowadłach rombówkich (b) [22]

## Modelowanie operacji walcowania prętów

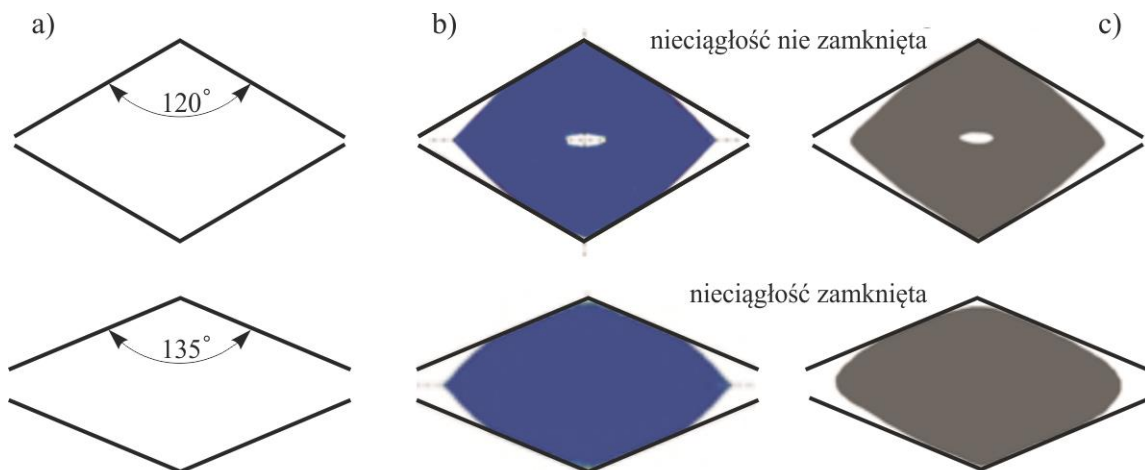
Podobnie jak w przypadku wstępnego przerobu wlewków kuźniczych, głównym celem początkowej fazy walcowania na gorąco prętów jest likwidacja wad struktury pierwotnej, która charakteryzuje się m.in. obecnością nieciągłości o różnym charakterze i rozmieszczeniu. Zagadnienie zamykania i spajania nieciągłości w odkształcanym plastycznie materiale było przedmiotem licznych badań prowadzonych w Politechnice Śląskiej i w Instytucie Metalurgii Żelaza [24, 25, 26]. Skupiały się one na ustalaniu wpływu warunków kształtowania plastycznego na zmianę geometrii otworów symulujących nieciągłości wewnętrzne i zmianę lokalnych stanów mechanicznych w obszarze występowania nieciągłości. Wyniki prowadzonych w programie Forge 2009 symulacji MES procesu walcowania prętów w różnych systemach kalibrowania wykazały, że pomiędzy intensywnością likwidacji nieciągłości materiałowych a lokalnymi zmianami odkształcenia i naprężenia w obszarze występowania tych wad istnieje ścisły związek. Można to zaobserwować, porównując na przykład walcowanie w wykroju owalnym wsadów o przekrojach okrągłym i kwadratowym, charakteryzujących się tym samym polem powierzchni (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Rozkłady poprzecznej składowej naprężenia odniesionej do naprężenia uplastyczniającego na wybranych przekrojach wsadu o przekroju kołowym (a) i o przekroju kwadratowym (b) walcowanych w wykroju owalnym; A-A – przekrój w płaszczyźnie wejścia kotliny walcowniczej, E-E – przekrój w płaszczyźnie wyjścia kotliny walcowniczej, [25]

We wsadzie o przekroju okrągłym zamknięcie nieciągłości nastąpiło mniej więcej w połowie długości kotliny odkształcenia, podczas gdy dla wsadu o przekroju kwadratowym – dopiero w pobliżu płaszczyzny wyjścia. Różnice te można powiązać z przebiegiem zmian składowych normalnych tensora naprężenia. W pobliżu osi wsadu o przekroju okrągłym w początkowej strefie kotliny walcowniczej występują poprzeczne naprężenia rozciągające (rys. 5.9 a), które w połączeniu z oddziaływaniem ściskających naprężeń w kierunku pionowym przyczyniają się do owalizacji kształtu przekroju poprzecznego nieciągłości, a następnie pozwalają na szybkie zbliżenie przeciwległych powierzchni nieciągłości. Wsad o przekroju kwadratowym w początkowej fazie walcowania styka się z wykrojem walców tylko w narożach. Powoduje to, że w pobliżu osi wsadu zarówno poprzeczna (rys. 5.9 b) jak i pionowa normalna składowa tensora naprężenia są ujemne. Nieciągłość w tej fazie operacji zmniejsza się mniej intensywnie, zachowując kołowy kształt przekroju poprzecznego. W konsekwencji zamykanie nieciągłości odbywa się praktycznie wzdłuż całego wykroju. Po zamknięciu otworu we wsadzie o przekroju okrągłym uzyskano znaczny przyrost wartości odkształcenia zastępczego w tym obszarze (ok. 0,2), co przy korzystnej, ujemnej wartości składowej normalnej naprężenia, prostopadłej do stykających się powierzchni, może spowodować spojenie nieciągłości.

Wiarygodność modelowania numerycznego procesu walcowania w wykrojach została zweryfikowana doświadczalnie. Modelowanie fizyczne procesu prowadzono na symulatorze Gleeble oraz na doświadczalnej linii walcowniczej [25, 27]. Porównanie przykładowych wyników modelowania numerycznego i fizycznego przedstawiono na rysunku 5.10.

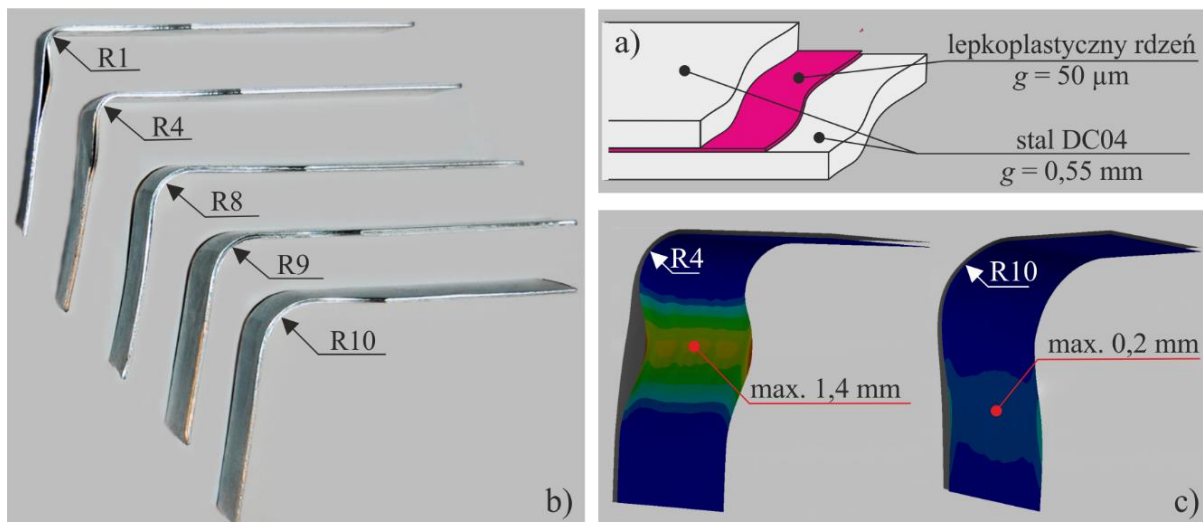


Rys. 5.10. Przekroje poprzeczne próbek z nieciągłością osiową odkształczanych w wykrojach rombów: a) zastosowany kąt rozwarcia kowadeł; b) wynik symulacji MES, c) wynik modelowania fizycznego [25]



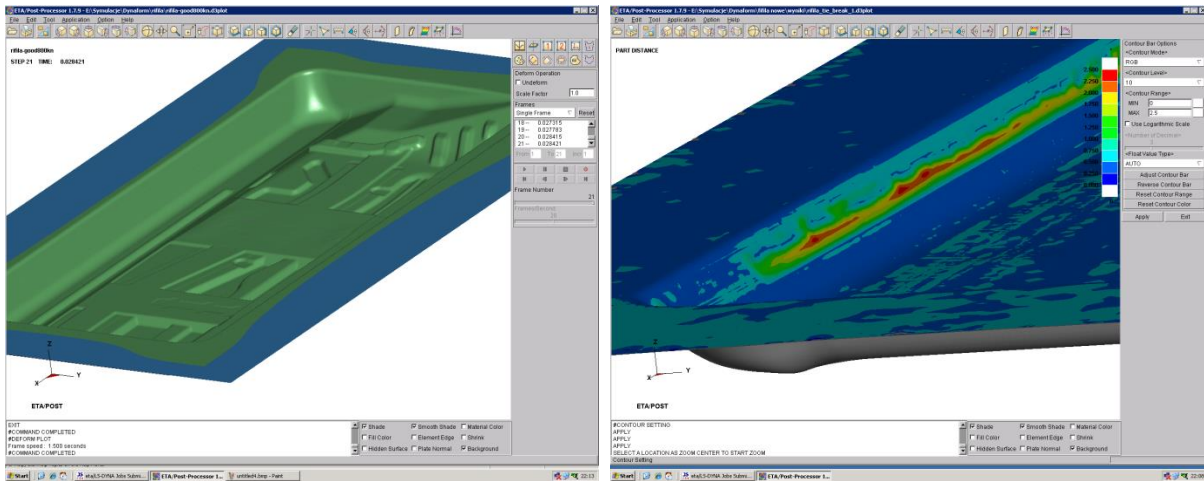
## Modelowanie operacji gięcia i tłoczenia blachy warstwowej

Nieustanne dążenie do doskonalenia wyrobów przy jednoczesnym zmniejszaniu kosztów produkcji oraz konieczności spełniania coraz bardziej wyśrubowanych przepisów związanych z bezpieczeństwem i ochroną środowiska skłania producentów z branży motoryzacyjnej do poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych. Przykładem tych dążeń są próby zastosowania tzw. blach warstwowych, takich jak np. Bondal czy Quiet Steel, na wybrane elementy karoserii w celu redukcji hałasu, szumów i drgań w przestrzeni pasażerskiej samochodów. Złożone są one z dwóch warstw stalowej blachy, pomiędzy którymi znajduje się bardzo cienka warstwa lepkoplastycznego polimeru (rys. 5.11 a). Podczas projektowania narzędzi oraz ustalania parametrów operacji tłoczenia należy wziąć pod uwagę ryzyko delaminacji (rozwarstwienia) tego typu materiałów. Wyniki prowadzonych w tym zakresie badań polegających na gięciu próbek z blach warstwowych przedstawiono na rysunku 5.10 b. Stwierdzono istotny wpływ cech geometrycznych narzędzi na występowanie i wielkość rozwarstwienia. W programie Dynaform przeprowadzono też symulacje MES odwzorowujące próby gięcia. Opracowano model operacji gięcia blachy warstwowej umożliwiający identyfikację efektu delaminacji, który wymagał doświadczalnego wyznaczenia krytycznych wartości naprężenia normalnego i stycznego, powodujących rozwarstwienie materiału odpowiednio w warunkach jednoosiowego rozciągania i czystego ścinania [28]. Uzyskane wyniki symulacji (rys. 5.11 c) w poprawny sposób odzwierciedliły wyniki eksperymentów.



Rys. 5.11. Schemat przykładowej struktury blachy warstwowej (a), wyniki prób gięcia blachy warstwowej z zastosowaniem różnych promieni gięcia (b) i wyniki symulacji MES wybranych prób gięcia (c) [28]

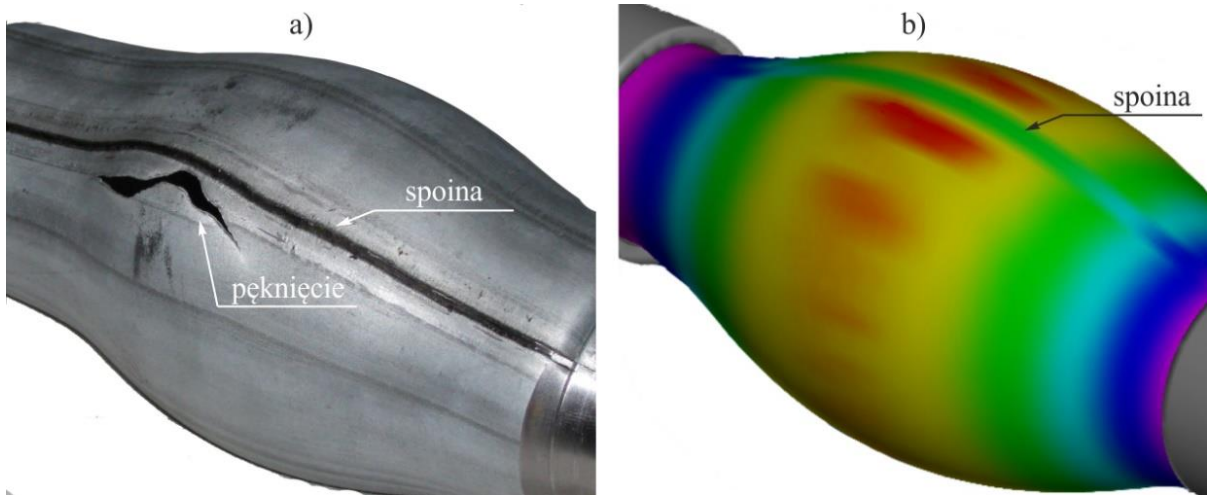
Zweryfikowany model został następnie wykorzystany do symulacji przebiegu innych operacji, takich jak na przykład operacji tłoczenia panelu podłogi samochodu z blachy warstwowej (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Wynik symulacji MES wskazujący prognozowane obszary delaminacji blachy warstwowej w wytłoczonym panelu podłogi samochodu z powodu zbyt małego zaokrąglenia krawędzi narzędzi

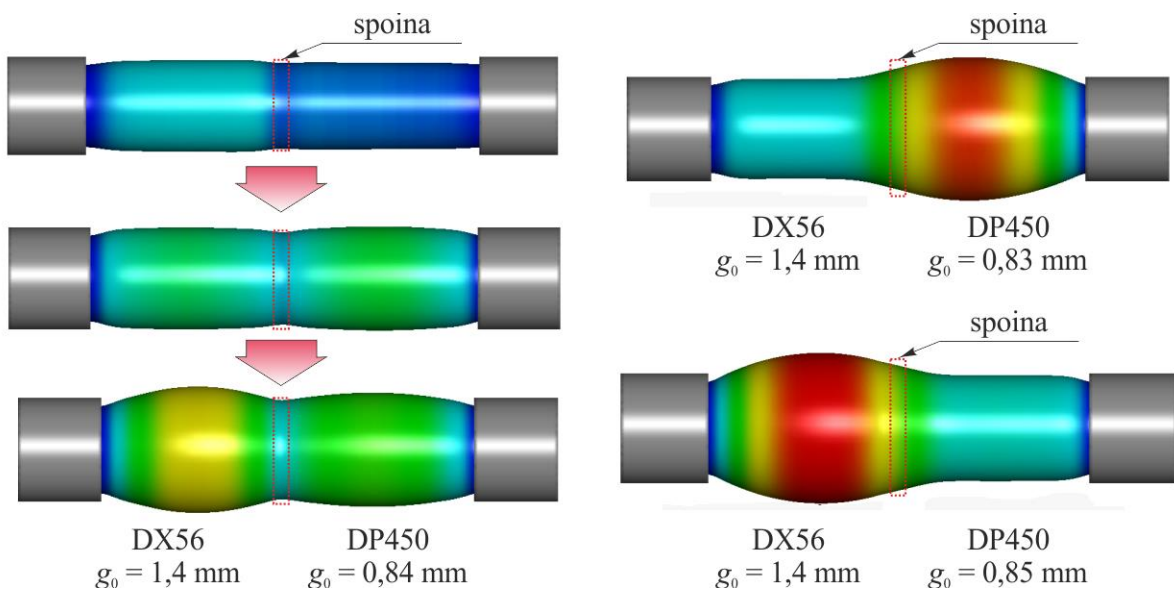
## Modelowanie operacji rozciągania rur ze spoiną laserową

Jedną z metod wytwarzania wyrobów cienkościennych o zamkniętym profilu jest rozciąganie cieczą (hydroforming) wsadów rurowych. Wyroby produkowane w ten sposób mogą mieć złożone kształty i stanowić alternatywę dla elementów wykonanych poprzez spajanie kilku wytłoczek. Przykład modelowania MES swobodnego rozciągania rury ze wzdłużną spoiną laserową przedstawiono na rys. 5.13. Model opracowano w programie Dynaform na podstawie warunków i wyników próby rozciągania cieczą przeprowadzonej na stanowisku badawczym na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej [29]. Próba miała na celu sprawdzenie poprawności wykonania i wytrzymałości spawu. Stalowy odcinek rury o średnicy 45 mm odkształcano do momentu pojawienia się pęknięcia, które wystąpiło w pobliżu spoiny. Dzięki wprowadzeniu w modelu wyodrębnionej strefy spoiny, charakteryzującej się innymi charakterystykami materiałowymi niż blacha w pozostałej części wsadu [30], otrzymano wynik symulacji z wyraźnym maksimum odkształcenia zastępczego zlokalizowanym w miejscu odpowiadającym obszarowi, w którym pojawiło się pęknięcie na próbce doświadczalnej. Symulacja MES swobodnego rozciągania rury pozwoliła m.in. na określenie odkształcenia granicznego materiału, z którego wykonano wsad, co można wykorzystać do projektowania narzędzi i ustalania parametrów procesu dla wyrobów o założonym kształcie.



Rys. 5.13. Wyniki modelowania procesu rozciągania cieczą stalowej próbki rurowej ze spoiną laserową: a) próbka po próbie doświadczalnej z widocznym pęknięciem, b) rozkład odkształcenia zastępczego w próbce, uzyskany za pomocą modelowania numerycznego [30]

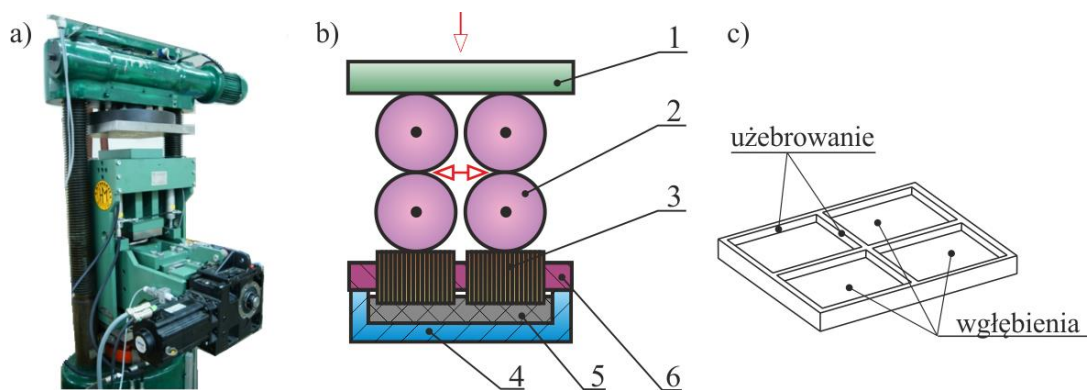
Wytrzymałość elementu rurowego zależy nie tylko od właściwości materiału, ale również od grubości ścianki. Na rysunku 5.14 przedstawiono przykładowe wyniki modelowania MES procesu swobodnego rozciągania cieczą wsadów składających się z dwóch odcinków rur połączonych spoiną obwodową [30]. Odcinki rur wykonane były z gatunków stali znacznie różniących się charakterystykami plastyczności. Celem badań było określenie, przy jakich początkowych grubościach poszczególnych części wsadu ich rozciąganie przy założonym ciśnieniu będzie następowało w sposób równomierny.



Rys. 5.14. Zmiany kształtu i rozkłady odkształcenia zastępczego w rozciąganych cieczą próbkach rurowych wykonanych z dwóch połączonych spoiną gatunków stali o zróżnicowanych właściwościach i różnej grubości ścianek [30]

## Modelowanie niekonwencjonalnych metod kształtowania

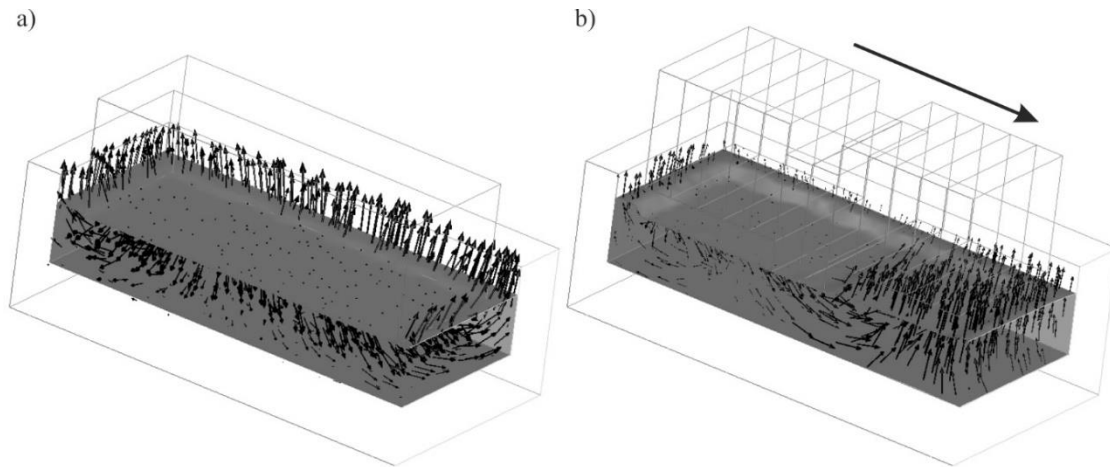
Metody modelowania fizycznego lub matematycznego są niezastąpione w przypadku projektowania nowych, niekonwencjonalnych procesów kształtowania plastycznego, gdyż pozwalają zweryfikować wiele założeń koncepcyjnych we wczesnej fazie projektowania, a tym samym znacznie ograniczyć czas i koszty badań. Jednym z rozwijanych na Wydziale Inżynierii Materiałowej niekonwencjonalnych procesów jest kucia za pomocą stempla podzielonego na segmenty (rys. 5.15) [16, 31]. Polega ono na wykonywaniu wgłębień o dużej powierzchni i głębokości poprzez sumowanie małych wgłębień pojedynczych segmentów o małej powierzchni nacisku. Proces ten może być na przykład zastosowany do wytwarzania elementów integralnych (np. wręg) w nowoczesnych konstrukcjach maszyn latających [32]. Nacisk prasy jest przekazywany w określonym momencie operacji jedynie na niewielkie fragmenty powierzchni odkształcanego materiału, co znacznie zmniejsza siłę kucia i umożliwia kształtowanie plastyczne na stosunkowo niewielkich prasach [33].



Rys. 5.15. Przyrząd do kucia segmentowym stemplem: a) widok przyrządu zamontowanego w przestrzeni prasy hydraulicznej, b) schemat ideowy: 1) płyta dociskowa, 2) rolki robocze, 3) stemple segmentowe, 4) matryca 5) kształtowany materiał, 6) oprawa stempli, c) modelowa odkuwka

Na rysunku 5.16 przedstawiono porównanie charakteru płynięcia materiału w odkuwce modelowej w procesie kucia konwencjonalnego i kucia ze stemplem podzielonym na segmenty. Podczas klasycznego kucia materiał pod środkiem stempla płynie w kierunku zgodnym z kierunkiem nacisku. Im bliżej krawędzi stempla, tym bardziej kierunek przemieszczeń odchyła się. Materiał, który tam się znajduje, jest wypychany poza obrys stempla i płynie w kierunku pionowym, wypełniając przestrzeń pomiędzy stemplami i ściankami matrycy. Najbardziej odkształcone są obszary w miejscach tworzenia się żeber. W procesie kucia segmentowego materiał pod wpływem nacisku kolejnych segmentów stempla płynie w kierunku zgodnym z ruchem rolki roboczej w danym przejściu. Jest on przy tym wypychany w górę nie tylko

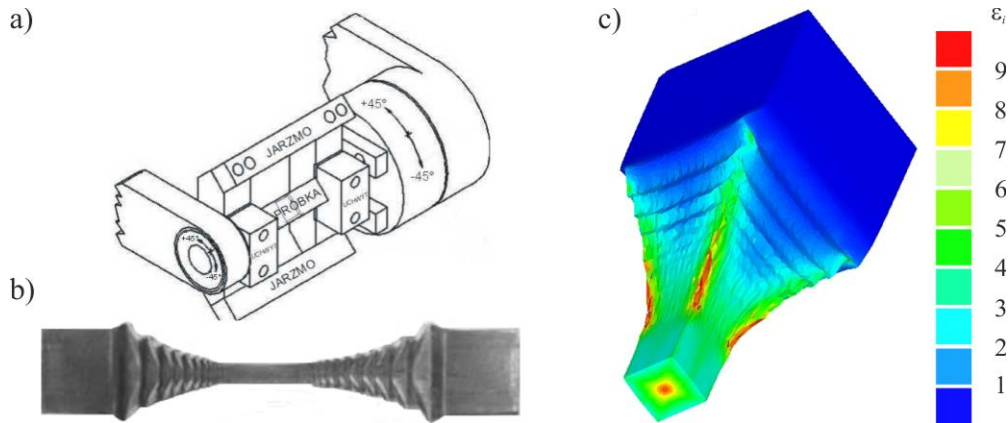
w obszarach powstawania żeber, ale również pod kolejne segmenty stempla w danym sektorze, co powoduje większe odkształcenie materiału pod wgłębieniami.



Rys. 5.16. Kierunki płynięcia materiału w odkuwce modelowej w procesie kucia konwencjonalnego (a) i kucia segmentowym stemplem (b) (strzałka wskazuje kierunek ruchu rolki roboczej) [33]

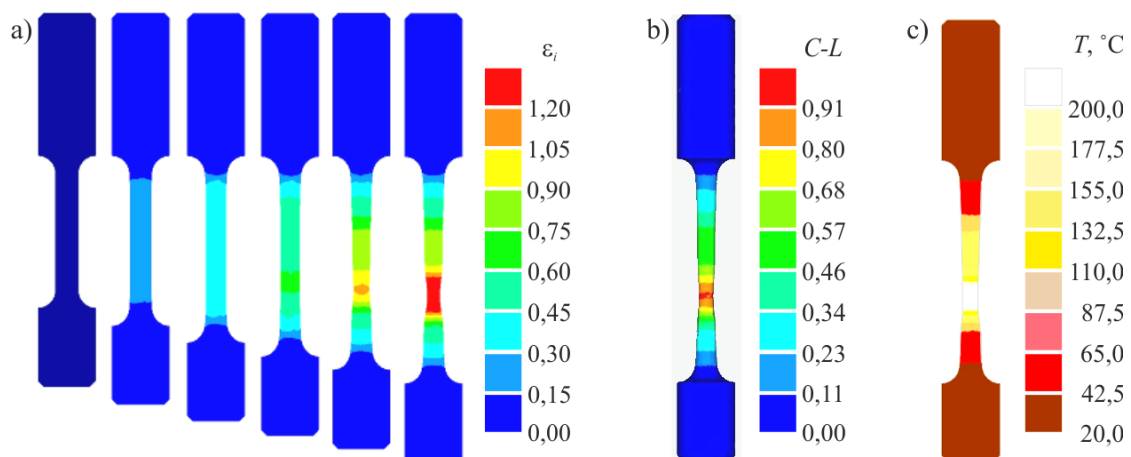
### **Modelowanie MES zachowania się materiałów podczas laboratoryjnych prób odkształcenia plastycznego**

Opracowano wiele metod doświadczalnych pozwalających na badanie zachowania się i zmian właściwości materiałów poddanych kształtowaniu plastycznemu. Na ich podstawie sformułowano i zweryfikowano również szereg wzorów analitycznych. Jednak z uwagi na takie czynniki jak duża liczba zmiennych występujących w trakcie prowadzenia eksperymentów, nieprecyzyjne utrzymywanie założonych parametrów próby czy też brak możliwości przeprowadzenia i rejestracji stosownych pomiarów, modelowanie tych prób za pomocą metody elementów skończonych pozwala na uzyskanie zbioru wyników, które uzupełniają wiedzę i wyniki uzyskane na drodze eksperymentalnej. Na rysunku 5.17 przedstawiono wyniki symulacji MES prowadzonej w programie Forge 2009 w celu ustalenia rzeczywistego rozkładu odkształcenia zastępczego w próbce poddanej wielokrotnemu ścisnaniu (naprzemiennie pod kątem  $90^\circ$ ) w module MaxStrain symulatora Gleeble. Charakterystyczny kształt odkształconej próbki wynika z faktu, że podczas doświadczenia końce próbki nie były zablokowane, dzięki czemu mogła się ona swobodnie wydłużać w kierunku osiowym. Dzięki zarejestrowanym danym eksperymentalnym, symulacje kolejnych zabiegów ścisnienia prowadzono w taki sposób, aby odzwierciedlały dokładny ich przebieg, z uwzględnieniem odstępstw od założonych parametrów próby. Wyniki symulacji pozwoliły skorelować wielkość odkształcenia plastycznego ze zmianami mikrostruktury w badanym materiale [34].



Rys. 5.17. Wyniki modelowania MES odkształcania próbki AlMg5 w module MaxStrain symulatora Gleeble: a) schemat modułu Maxstrain, b) widok odkształconej próbki, c) rozkład odkształcenia zastępczego po 32. ściskaniu [34]

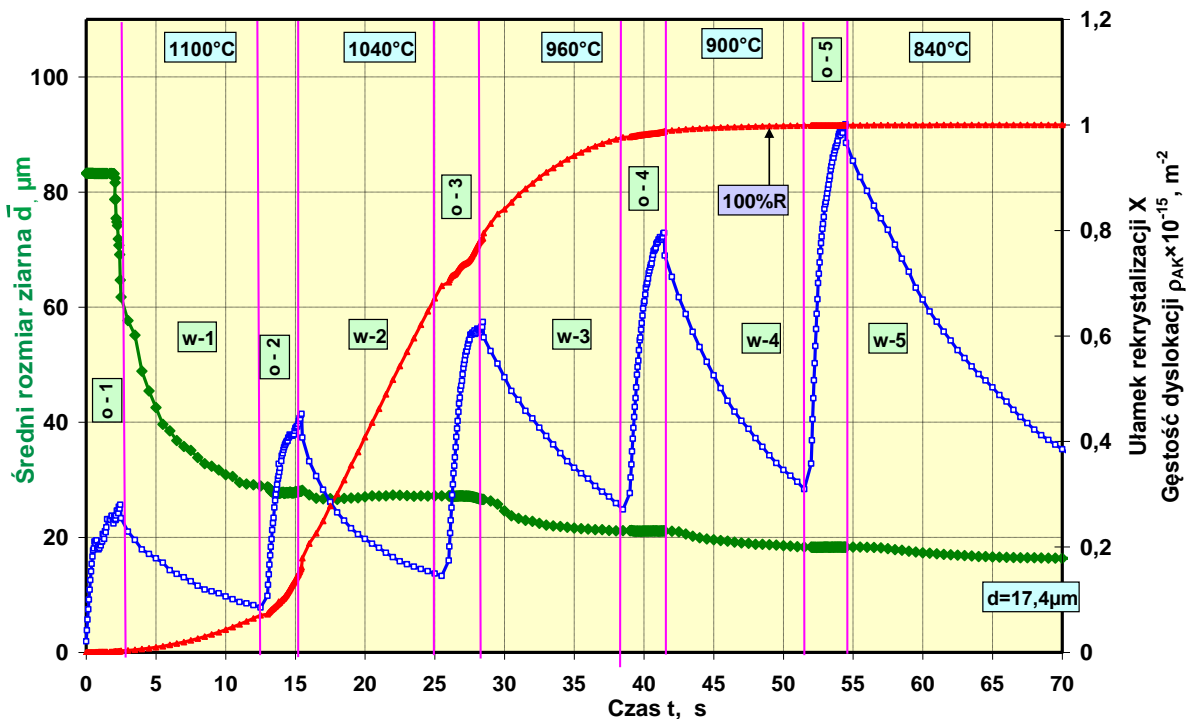
Na rysunku 5.18 przedstawiono wyniki symulacji MES prowadzonej w programie Simufact. Forming w celu wyznaczenia rozkładu odkształcenia zastępczego, krytycznej wartości całki w modelu pęknięcia Cockrofta-Lathama (dla granicznej wartości odkształcenia zastępczego) oraz przyrostu temperatury w próbce z austenitycznej stali wysokomanganowej poddanej dynamicznemu rozciąganiu za pomocą młota rotacyjnego. Dane te mogą zostać wykorzystane do modelowania zachowania się elementów konstrukcyjnych pojazdów, odpowiadających za bezpieczeństwo bierne, w warunkach występujących w trakcie kolizji oraz do ustalenia wpływu dużych prędkości odkształcenia na zjawiska zachodzące w mikrostrukturze [35]. W konsekwencji możliwe jest zaprojektowanie zoptymalizowanych, wielofunkcyjnych elementów konstrukcyjnych, wykorzystujących specyficzne właściwości materiałów mających zdolność pochłaniania i rozpraszania dużej ilości energii kinetycznej.



Rys. 5.18. Wyniki modelowania MES dynamicznej próby rozciągania (z prędkością 30 m/s) próbki ze stali X55MnAl25-5: a) rozkład odkształcenia zastępczego, b) rozkład wartości całki Cockrofta-Lathama, c) rozkład temperatury [35]

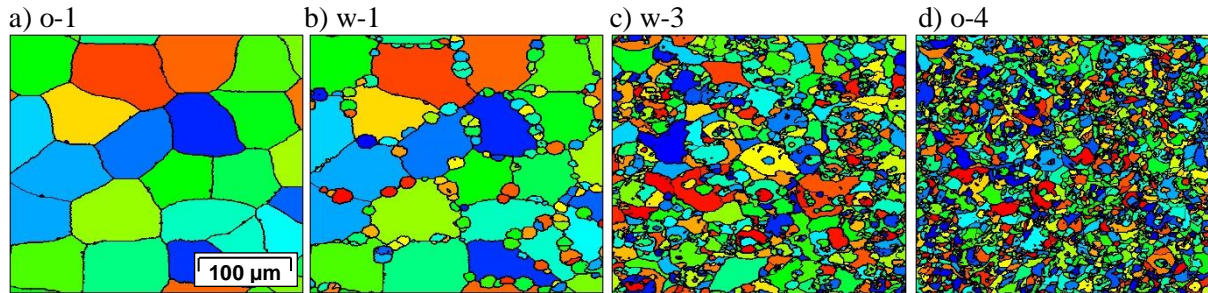
## Modelowanie zmian mikrostruktury materiałów odkształcanych na gorąco

Właściwości technologiczne stopów metali jak i właściwości użytkowe gotowych wyrobów w dużej mierze zależą od mikrostruktury materiału. Projektowanie procesów przeróbki plastycznej bądź obróbki cieplno-plastycznej wymaga zatem uwzględnienia zjawisk zachodzących w skali mikro, takich jak np. rekrytalizacja. Przykładem zastosowania modelowania fizycznego i matematycznego do analizy ewolucji mikrostruktury w stopach metali poddanych odkształceniu plastycznemu na gorąco są badania Kuca [36]. W oparciu o wyniki modelowania fizycznego, przeprowadzonego za pomocą symulatora cieplno-mechanicznego Gleeble 3800, opracowano model umożliwiający prognozowanie zmian mikrostruktury w procesach takich jak walcowanie, kucie czy ciągnięcie na gorąco, podczas których występują przerwy pomiędzy kolejnymi odkształczeniami. Modelowanie prowadzono za pomocą opartego na metodzie automatów komórkowych programu komputerowego „CADrx-multipass”, opracowanego w Katedrze Informatyki Stosowanej i Modelowania w AGH [12]. Przeprowadzone symulacje umożliwiły wyznaczenie zmian wskaźników opisujących kinetykę procesów odbudowy mikrostruktury, tj. średni rozmiar ziarna, średnia gęstość dyslokacji oraz ułamek rekrytalizacji (rys. 5.19).



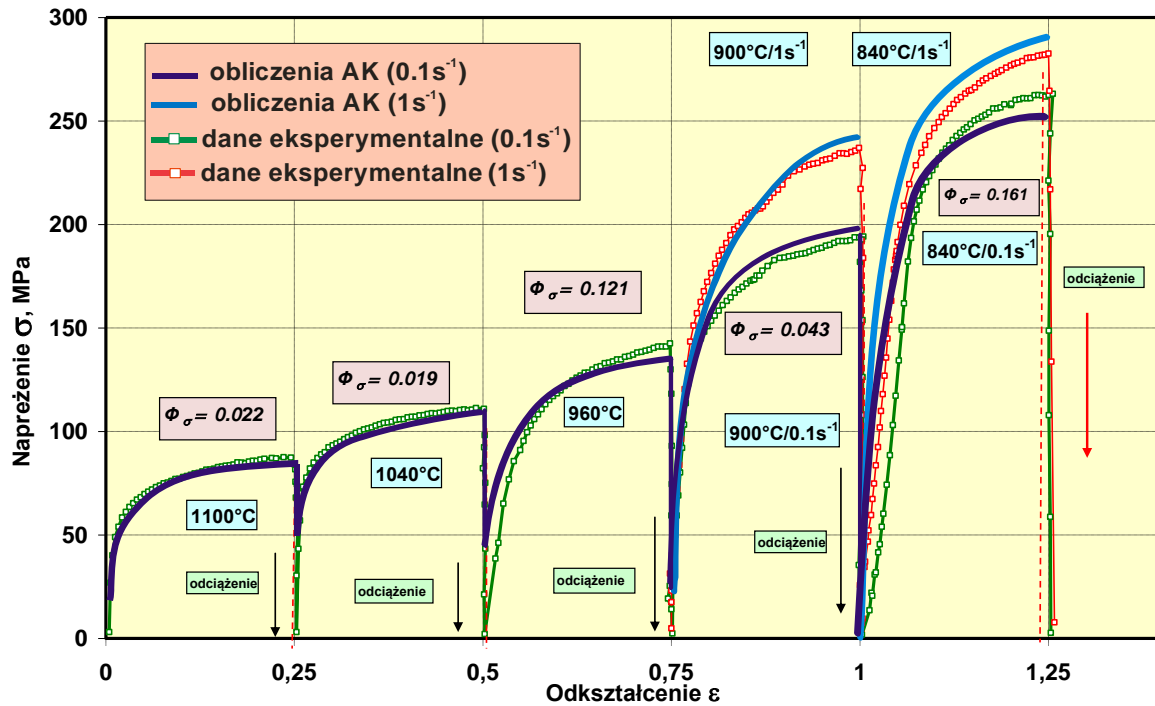
Rys. 5.19. Zmiany średniego rozmiaru ziarna, średniej gęstości dyslokacji oraz ułamka rekrytalizacji, obliczone dla stali austenicznej X3CrNi18-10 poddanej pięciokrotnemu ścisnieniu z dziesięcio-sekundowym wytrzymaniem pomiędzy kolejnymi odkształczeniami [36]

Na podstawie uzyskanych wyników opracowano obrazy odzwierciedlające zmiany w mikrostrukturze (rys. 5.20). Udział frakcji ziaren zrekrystalizowanych odpowiada ułomkowi rekrytalizacji przedstawionemu na rysunku 5.19 w danym momencie eksperymentu.



Rys. 5.20. Modelowe mikrostruktury stali austenicznej X3CrNi18-10 po pierwszym (a) i czwartym (d) ścisnieniu oraz po pierwszej (b) i trzeciej (c) przerwie między odkształceniami (c) [36]

Obliczone metodą automatów komórkowych naprężenie w kolejnych fazach odkształcania, wykazuje dużą zgodność z danymi doświadczalnymi, zarówno dla eksperymentów prowadzonych z małą jak i dużą prędkością odkształcania (rys. 5.21).



Rys. 5.21. Porównanie naprężenia obliczonego na podstawie modelowania metodą automatów komórkowych z wynikami eksperymentów pięciokrotnego ścisnienia próbek ze stali austenicznej X3CrNi18-10 [36]



## 5.4. Podsumowanie

Przytoczone przykłady dowodzą, że w dobie dynamicznego rozwoju komputeryzacji oraz elektronicznych przyrządów i urządzeń pomiarowych matematyczne metody modelowania procesów przeróbki plastycznej w połączeniu z eksperymentami fizycznymi są bardzo efektywnym i skutecznym narzędziem wspomagającym dobór parametrów procesów przeróbki plastycznej i obróbki cieplno-plastycznej. Zastosowanie obu sposobów modelowania pozwala na uzyskanie pełniejszej, komplementarnej wiedzy na temat analizowanego procesu. Przy ograniczonym dostępie do baz danych materiałowych, modelowanie fizyczne umożliwia określenie wartości parametrów niezbędnych do poprawnego zdefiniowania modelu matematycznego. Modelowanie fizyczne może być również przeprowadzane w celu weryfikacji wyników symulacji numerycznych.

Intensywny rozwój komercyjnych programów MES do modelowania procesów przeróbki plastycznej wskazuje, że metoda ta znalazła powszechne uznanie wśród producentów i w wielu przypadkach jest wystarczająca dla uzyskania rozwiązań problemów inżynierskich pojawiających się w ich zakładach. Niemniej jednak, w programach tych coraz częściej wprowadzane są rozwiązania opracowywane i rozwijane na uczelniach technicznych, które pozwalają na prowadzenie modelowania wieloskalowego umożliwiającego szczegółową analizę rozwoju mikrostruktury czy lokalizacji odkształcenia podczas przeróbki plastycznej bądź obróbki cieplno-plastycznej.

Zasadność wykorzystania modelowania do projektowania procesów jest tym większa, im bardziej konieczne jest precyzyjne sterowanie i utrzymywanie założonych parametrów technologicznych. Należy jednak zaznaczyć, że nawet najbardziej zaawansowany program komputerowy, umożliwiający modelowanie różnych aspektów związanych z procesem technologicznym, w dalszym ciągu pozostaje jedynie narzędziem wspomagającym podejmowanie przez konstruktora czy technologa racjonalnych i odpowiedzialnych decyzji. Dokładność wyników modelowania numerycznego jest zdeterminowana poprawnością odwzorowania rzeczywistego procesu technologicznego, a do tego wymagana jest znajomość zjawisk zachodzących w trakcie procesu, umiejętność ich matematycznego zdefiniowania oraz wiedza na temat czułości wyników na zmiany określonego parametru wejściowego. Wiedza i doświadczenie użytkownika są zatem niezbędne zarówno do zdefiniowania modelu symulacyjnego jak i do interpretacji uzyskanych wyników symulacji.

## Bibliografia

1. Kowalczyk L.: Modelowanie fizykalne procesów obróbki plastycznej. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 1995.
2. Pater Z., Tomczak J., Wójcik Ł., Bulzak T.: Physical modelling of the ball-rolling processes. *Metals*, 9, 35, 2019, <https://doi.org/10.3390/met9010035>.
3. Hadasik E.: Badania plastometryczne metali. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
4. Laber K.: Problemy fizycznego modelowania procesów walcowania walcówki z dużymi prędkościami. *Obróbka Plastyczna Metali*, 27 (2), 2016, s. 119–132.
5. Woźniak D., Garbarz B.: Linia do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania stopów metali i wyrobów metalowych. *Prace IMŻ*, 60 (1), 2010, s. 61-67.
6. Schindler I., Danemark J., Sarovsky J.: Stale niskostopowe. [w:] Hadasik E. (red): *Przetwórstwo metali. Plastyczność a struktura*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006, s. 71-92.
7. Kawalla R.: Practice relevant laboratory simulation of hot strip rolling. 3rd European Rolling Conference Proceedings, Dusseldorf, Germany, 16-20.06.2003, s. 332-336.
8. Wasiuń P.: Teoria procesów kucia i prasowania. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
9. Pietrzyk M.: Metody numeryczne w przeróbce plastycznej metali. Skrypt AGH nr 1303, Kraków 1992.
10. Malinowski Z.: Numeryczne modele w przeróbce plastycznej i wymianie ciepła. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005.
11. Pidvysotsky V, Kuziak R.: Modelowanie procesu termomechanicznego kucia odkuwek z uwzględnieniem stanu struktury. *Prace IMŻ*, 69 (1), 2017, s. 37-52.
12. Gawąd J.: Modelowanie wieloskalowe metodą automatów komórkowych własności materiałów odkształcanych plastycznie. Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Kraków 2008 (niepublikowana).
13. Pietrzyk M., Madej Ł., Rauch Ł., Szeliga D.: Computational materials engineering: achieving high accuracy and efficiency in metals processing simulations. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2016.

14. Madej Ł.: Development of the modelling strategy for the strain localization simulation based on the digital material representation. Wydawnictwo AGH, Kraków 2010.
15. Madej Ł.: Digital/virtual microstructures in application to metals engineering – a review. Arch Civ Mech Eng, 17, 2017, s. 839–854.
16. Szyndler R., Grosman F., Tkocz M., Dellanay L., Wang J., Muszka K., Madej Ł.: Through scale material flow investigation in novel incremental bulk forming process. Journal of Materials Processing Tech., 287, 2021, 116487, s. 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116487>.
17. Madej Ł., Mojżeszko M., Chrapoński J., Roskosz S., Cwajna J.: Digital material representation model of porous microstructure based on 3d reconstruction algorithm. Arch Metall Mater, 62 (2), 2017, s. 563-569.
18. Saby M., Bouchard P.O., Roux E., Bernacki M.: Three-dimensional analysis of real void closure at the meso-scale during hot metal forming processes. Computational Materials Science, 77, 2013, s. 194–201.
19. Grosman F.: Analiza wpływu procesu kucia w kowarkach na własności wyrobu. Praca hab., Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo, z. 22, Gliwice 1980.
20. Piela A.: Zastosowanie numerycznej symulacji do analizy i projektowania technologii kucia w kowarkach. Praca hab., Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo, z. 52, Gliwice 1996.
21. Piela A.: Analysis of the metal flow in swaging – numerical modelling and experimental verification. Int J Mech Sci, 39 (2), 1997, s. 221-231.
22. Tkocz M.: Analiza przestrzenna lokalnych stanów termomechanicznych w procesie kucia wydłużającego w kowadłach kształtowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katowice 2005 (niepublikowana).
23. Tkocz M., Grosman F.: Pass schedule design for cogging in v-dies. Steel Research Int., Special Edition – Proc. 12th Int. Conf. Metal Forming 2008, AGH Kraków, Poland, Publ. Verlag Stahleisen GmbH, Vol. 1, 2008, s. 584-590.
24. Woźniak D., Tkocz M., Cyganek Z.: Zmiany stanów termomechanicznych w pobliżu pęknięć w strefach przypowierzchniowej i środkowej ciągłego wlewka płaskiego w procesie walcowania na gorąco blach. Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 8, 2009, s. 670-673.

25. Grosman F., Tkocz M., Woźniak D.: Analiza stanów mechanicznych towarzyszących zamykaniu i spajaniu nieciągłości materiału w procesach przeróbki plastycznej. *Prace IMŻ*, 62 (1), 2010, s. 68-72.
26. Grosman F., Hadasik E., Tkocz M., Cyganek Z.: Symulacja zamykania i spajania nieciągłości wsadu w procesach walcowania blach i prętów. *Prace IMŻ*, 64 (1), 2012, s. 71-75.
27. Woźniak D.: Wpływ stanów mechanicznych w kotlinie walcowniczej na zamykanie i zgrzewanie nieciągłości we wlewkach z COS, *Prace IMŻ*, Monografia Nr 3, 2013, Wyd. IMŻ Gliwice.
28. Tkocz M.: Identification of delamination in steel sandwich sheets during forming by means of the numerical simulation. *Proceedings of AutoMetForm 2010/SFU 2010 - 2nd International Conference on Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry in association with 17th Saxon Conf. on Forming Technology*, Freiberg, 24-26.11.2010, s. 417-420.
29. Hycza-Michalska M., Hydroforming jako nowoczesna metoda kształtowania elementów karoserii samochodowej, *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, 74 (5), 2007, s. 255-259.
30. Gawelczyk A.: Modelowanie numeryczne kształtowania wsadów rurowych połączonych z komponentów o zróżnicowanych właściwościach. Praca magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katowice, 2009, (niepublikowana).
31. Tkocz M., Grosman F.: Application of incremental metal forming for production of aircraft integral panels. *Solid State Phenom.*, 212, 2014, s. 243-246.
32. Tkocz M., Grosman F.: Parametry siłowo-energetyczne procesu kształtowania segmentowego, *Prace Naukowe Mechanika*, z. 253, red. A. Kocańda, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013, s. 77-82
33. Tkocz M., Grosman F.: Analiza płynięcia materiału w procesie kucia segmentowego, *Hutnik – Wiad. Hutnicze*, 9, 2013, s. 649-652.
34. Rodak K., Pawlicki J., Tkocz M.: Deformation-induced grain refinement in AlMg5 alloy. *Solid State Phenom.*, 191, 2012, s. 37-44.
35. Jabłońska M.: Struktura i właściwości austenitycznej stali wysokomanganowej umacnianej wskutek mechanicznego bliźniakowania w procesach deformacji dynamicznej. Praca hab., Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
36. Kuc D.: Modelowanie zmian mikrostruktury i właściwości odkształcanych na gorąco stopów metali z zastosowaniem metody automatów komórkowych. Praca hab., Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.

## List of figures

- Fig. 5.1. Generalized procedure for application of mathematical or physical modelling in a production process design
- Fig. 5.2 Local major and minor strains in the selected area of a bulged sheet metal sample, calculated from deformations of the square marking grid
- Fig. 5.3. A view (a) and a schematic diagram (b) of the torsion plastometer at the Faculty of Materials Engineering, SUT, 1-motor, 2-gear, 3-clutch and brake system, 4-pulser, 5-movable grip, 6-inductor, 7-sample, 8-immovable grip, 9-movable support for torque and axial force sensors, P-pyrometer, RO-rotation regulator, CP-sample cooling system, CH-cooler, HFG- high frequency generator, RT-temperature regulator
- Fig. 5.4. Determination of geometric features of 2D models for radial forging according to the round-square pass sequence (1,2,3 ... n – subsequent cross-sections) [20]
- Fig. 5.5. Comparison of physical modelling (a) and FE simulation (b) results (effective strain distribution in a radially-forged billet according to the round-square pass sequence) [20]
- Fig. 5.6. Effective strain distribution on the surface and the selected sections of a billet subjected to cogging in V-dies [22]
- Fig. 5.7. An ingot temperature distribution due to its transfer from a furnace to a press [22]
- Fig. 5.8. Distribution of the longitudinal stress component (in relation to the flow stress) in the selected sections of a billet subjected to cogging in flat dies (a) and V-dies (b) [22]
- Fig. 5.9. Distribution of transverse stress component (in relation to the flow stress) in the selected sections of round (a) and square (b) billet rolled in the oval pass; A-A – a cross section in the entry plane of deformation gap, E-E – a cross section in the exit plane of deformation gap [25]
- Fig. 5.10. Cross sections of samples with axial void, deformed in diamond passes with different die angles: a) applied die angle, b) FEM simulation results, c) physical modelling results [25]
- Fig. 5.11. A schematic diagram of the sandwich sheet structure (a), results of sandwich sheet bending tests with different bending radii (b) and the selected bending test FEM simulations [28]
- Fig. 5.12. FEM results indicating predicted delamination areas of a sandwich-sheet automotive floor panel due to insufficient edge radii of the dies
- Fig. 5.13. Results of the hydroforming test performed for a laser welded sample: a) the fractured sample after experiment, b) effective strain distribution on the sample surface obtained by means of numerical modelling [30]
- Fig. 5.14. Changes in shape and effective strain distribution in hydroformed laser welded tubular samples made of two steels with different properties and different wall thickness [30]
- Fig. 5.15. A device for forging with segmented punch: a) a view of the device mounted in the working space of a hydraulic press, b) a schematic diagram of the device: 1) pressure plate, 2) working rolls, 3) segmented punches, 4) die 5) workpiece, 6) die housing, c) model forging
- Fig. 5.16. Directions of material flow in a model forging during conventional forging (a) and incremental forging (b) (the arrow indicates direction of working roll motion) [33]

Fig. 5.17. FEM results obtained for deformation of the AlMg5 sample in the MaxStrain module of the Gleeble simulator: a) a schematic diagram of the MaxStrain module, b) a view of the deformed sample, c) effective strain distribution after 32 compression [34]

Fig. 5.18. FEM results of dynamic tensile test (performed with the linear speed of 30 m/s) performed for X55MnAl25-5 steel sample: a) effective strain distribution, b) Cockcroft-Latham integral distribution, c) temperature distribution [35]

Fig. 5.19. Changes of the average grain size, the average dislocation density and the recrystallized volume fraction in the X3CrNi18-10 austenitic steel subjected to fivefold compression with 10 s interpass times [36]

Fig. 5.20. Model microstructures of the X3CrNi18-10 austenitic steel obtained by cellular automata [36]

Fig. 5.21. Comparison of stress calculated on a basis of the cellular automata modelling and measured during fivefold compression of X3CrNi18-10 austenitic steel samples [36]

# **PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES**

## **Abstract**

The role of modeling, especially in engineering, is very important. They are used to solve a specific problem and help to understand the issue under the study. This book aims to present the development of modeling of technological processes, using both physical and mathematical approaches.

The book starts with an introduction that covers an overview of the field of mathematical and physical modeling, that explains all aspects related to both approaches to technological process modeling.

In the chapter entitled “Technological processes modeling by the use of artificial intelligence methods” authors present various applications of artificial intelligence methods. They focus on applications of machine learning methods and artificial neural networks to model steel melting process, as well as sheet galvanizing, ending with an example of predictive maintenance application of AI systems.

The next chapter presents an overview over the fifty years of the development of modeling techniques applied to metallurgical processes. The chapter presents the history of the development of the Model Research Laboratory and the results of selected works carried out with the use of water models and numerical simulations.

Chapter 3 discusses the modeling of the refining process of aluminum alloys. It focuses on the refining process of aluminum alloys in induction and cold crucible furnaces. The chapter presents the results of the research on the refining process and electricity consumption in both types of induction furnaces, the analysis is extended by measuring the surface areas of the resulting meniscus.

The next chapter presents the results of stand and model research of the temperature characteristics of a compact sunflower and honeycomb heat regenerator for gas burners. The developed mathematical model enables the verification of new regenerator filling structures as well as the analysis of the suitability of the material for the purpose of regenerator construction.

The last chapter concerns the modeling of metal forming processes. It focuses on methods currently used to design and analyze both metal forming and thermo-mechanical treatment processes. This process is presented on several examples that demonstrate that mathematical modeling of metal forming and thermo-mechanical treatment processes coupled with corresponding physical experiments is a very efficient tool for the selection and optimization of process parameters and the die design.





**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ**  
**ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice**  
**tel. (32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02**  
**[www.wydawnictwopolitechniki.pl](http://www.wydawnictwopolitechniki.pl)**

**Sprzedaż i Marketing**  
**tel. (32) 237-18-48**  
**[wydawnictwo\\_mark@polsl.pl](mailto:wydawnictwo_mark@polsl.pl)**

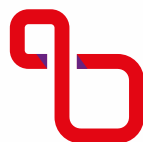
**Sprawy wydawnicze**  
**tel. (32) 237-13-81**  
**[wydawnictwo@polsl.pl](mailto:wydawnictwo@polsl.pl)**

---

10 ark. wyd.

---

e-wydanie



**UCZELNIA  
BADAWCZA**  
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI



Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5  
tel. (32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02  
[www.wydawnictwopolitechniki.pl](http://www.wydawnictwopolitechniki.pl)

Dział Sprzedaży i Reklamy  
tel. (32) 237-18-48  
e-mail: [wydawnictwo\\_mark@polsl.pl](mailto:wydawnictwo_mark@polsl.pl)  
<http://www.polsl.pl/Jednostki/RJO2-WPS>

e-ISBN 978-83-7880-758-2 880