

# 1. Wstęp

## 1.1. Motywacja

Współczesne technologie związane z przemysłem lotniczym, samochodowym, elektronicznym, medycznym i wielu innymi wymagają stosowania materiałów bardzo wysokiej jakości. Wiele ze stosowanych w tych technologiach elementów jest otrzymywanych w rezultacie procesów krzepnięcia. Uzyskanie wymaganej jakości takiego elementu wymaga dokładnego rozpoznania i kontrolowania wszystkich zjawisk fizycznych towarzyszących procesom krzepnięcia, tak aby otrzymany produkt odlewniczy pozbawiony był niejednorodności i defektów. Powszechna już obecnie dostępność wysokowydajnych komputerów i rozwój technik numerycznych pozwala zastąpić żmudny proces modyfikacji procedur technologicznych przez odpowiednio dostosowane symulacje numeryczne. Analiza i kontrola procesów krzepnięcia metodami symulacji numerycznej może pozwolić na efektywną optymalizację procesu przemysłowego. Na ogół wymaga ona jednak wykonania licznych prób i trudnych pomiarów „*in vivo*”, aby można było uznać za wiarygodne rezultaty uzyskane w wirtualnym świecie komputera. Niestety, powszechnie występujące w procesach przemysłowych trudności z uzyskaniem dostatecznie dokładnych danych empirycznych uniemożliwiają pełną atestację symulacji numerycznych i w praktyce jedynie niewielki odsetek instalacji przemysłowych korzysta z osiągnięć komputerowej optymalizacji procesów odlewniczych.

W obecnej pracy proponuje się alternatywne rozwiązanie, polegające na uwiarygodnieniu stosowanych procedur numerycznych już na etapie ich tworzenia. Takie uwiarygodnienie założeń fizycznych najwygodniej jest prowadzić przy użyciu modelowych eksperymentów, które można zrealizować i kontrolować w skali laboratoryjnej. Pozwala to na znaczną poprawę dokładność badań i minimalizuje ich koszt. Wykorzystanie modelu eksperymentalnego do kontroli poprawności rozwiązań numerycznych jest często zwane walidacją kodu numerycznego (od angielskiego terminu *validation*). W odróżnieniu od weryfikacji matematycznej poprawności symulacji numerycznej, której m.in. służą numeryczne wzorce porównawcze (ang. *numerical benchmark*), walidacja kodu numerycznego ma za zadanie odpowiedzieć na pytanie, czy przeprowadzona symulacja numeryczna poprawnie opisuje fizykę zjawiska, uwzględnia istotne dla danego procesu warunki, własności substancji i wzajemne sprzężenia. Przeprowadzenie takiej walidacji wymaga stworzenia wzorca fizycznego, czyli tzw. *experimental benchmark*.

Jak ważny staje się problem wiarygodności symulacji numerycznych w mechanice płynów może świadczyć fakt, że American Institute of Aeronautics and Astronautics utworzył komitet do spraw standardów danych CFD (Computational Fluid Dynamics) oraz zorganizował bazę danych modeli eksperymentalnych używanych do certyfikacji kodów CFD. Procedury testowania symulacji muszą być oparte na danych pochodzących z wzorcowych modeli eksperymentalnych, zatem proces tworzenia i badania takich modeli musi uwzględniać potrzeby twórców i użytkowników kodów numerycznych. Podobną inicjatywę podjęto w Europie i w ramach jednego z europejskich projektów badawczych 5PR UE utworzono sieć tematyczną FLOWnet (Flow Library On the Web network). Podstawowym zadaniem tej sieci jest dostarczanie naukowej i przemysłowej wspólnocie narzędzi do weryfikacji i walidacji symulacji numerycznych przepływów.

Procesy odlewnicze ze względu na swoją specyfikę nie doczekały się dotychczas jednolitych zasad certyfikacji kodów numerycznych. Istnieje wprawdzie szereg grup uniwersyteckich intensywnie pracujących nad stworzeniem przemysłowych wzorców procesów odlewniczych. Rezultaty tych badań są przedmiotem regularnych doniesień w specjalistycznych czasopismach i na konferencjach poświęconych modelowaniu procesów odlewniczych. Warto tutaj wymienić na przykład wzorzec eksperymentalny zaproponowany przez Sirrell'a i innych na seryjnej konferencji *Modelling of Casting* (1995, [57]). Badana geometria składała się z wąskiego kanału o wysokości ok. 40cm, przez który do niewielkiej komory zalewowej wlewano płynne aluminium. Mimo bardzo kosztownej aparatury rentgenowskiej oraz precyzyjnego systemu pomiaru temperatury, uzyskane informacje sprowadzały się do bardzo niedokładnego opisu dynamiki ruchu powierzchni ciecży.

Brak informacji o granicy frontu fazowego, rozkładach pól prędkości i temperatury jest charakterystyczny dla tego typu przemysłowych wzorców eksperymentalnych. Dlatego nie budzi zdziwienia, że oczekiwane przez autorów tego wzorca przeprowadzenie walidacji symulacji numerycznych zakończyło się niepowodzeniem. Żaden z zaproponowanych kodów numerycznych nie pozwolił na jakościową zgodność obserwowanego procesu, a o zgodności ilościowej trudno było mówić z braku wystarczająco dokładnych danych eksperymentalnych.

Proponowane w obecnej pracy laboratoryjne wzorce eksperymentalne mają za zadanie rozpoznanie zjawisk fizycznych typowych dla technologii przemysłowych i zweryfikowanie dopuszczalności uproszczeń powszechnie stosowanych w przemysłowych programach numerycznych. Użyteczność takich modeli eksperymentalnych wykracza daleko poza rolę wzorca, bo w powiązaniu z właściwym modelem numerycznym tworzą one świetne narzędzie diagnostyki i usprawniania technologii oraz badania i interpretowania zjawisk fizycznych obserwowanych w laboratoriach badawczych. Jest natomiast oczywiste, że uwiarygodnienie modelu fizycznego badanego kodu numerycznego w skali laboratoryjnej jest warunkiem koniecznym ale niewystarczającym dla zastosowania otrzymanych rezultatów w symulacjach procesów przemysłowych. Proponowana metodologia wskazuje jednak na źródła błędów i może w znacznym stopniu zredukować liczbę niewiadomych w końcowej procedurze walidacyjnej.

## 1.2. Wybór konfiguracji

Stosowanie we wzorcach eksperymentalnych materiałów typowych dla przemysłowych procesów krzepnięcia ma ograniczone zastosowanie z uwagi na wysokie temperatury topnienia (powyżej 1500K) oraz brak możliwości penetracji tych materiałów przez klasyczne metody pomiarowe. Dodatkowym problemem jest często spotykany dla takich substancji brak dokładnych danych fizycznych i termodynamicznych w temperaturach bliskich temperaturze topnienia. Biorąc pod uwagę problemy eksperymentalne i wysokie koszty takich badań, interesująca wydaje się alternatywna koncepcja polegająca na wykorzystaniu substancji o dobrze znanych własnościach fizycznych, przezroczystych optycznie i zapewniających możliwość kontroli procesu przemiany fazowej w umiarkowanych temperaturach, dostępnymi powszechnie metodami eksperymentalnymi. Tego typu eksperymenty, często zwane *analogami* procesów przemysłowych, pozwalają na stworzenie wzorców do uwiarygodnienia założeń fizycznych modeli numerycznych stosowanych później w warunkach przemysłowych. Należy jednak pamiętać, że nie zawsze jest to wystarczające kryterium wiarygodności. Tak uwiarygodniony model numeryczny, zastosowany dla materiałów o silnie nieliniowych parametrach, w innym zakresie bezwymiarowych liczb charakterystycznych (Reynoldsa, Rayleigha czy Prandtla) może prowadzić do błędnej prognozy. Z drugiej strony niepowodzenie odwzorowania „*analogowego*” wzorca eksperymentalnego, z pewnością wskazuje na podstawowe braki modelu w zakresie poprawności, czy pełności opisu zjawiska fizycznego.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie roli zjawisk przepływowych i ich wpływu na produkt końcowy będący wynikiem procesu krzepnięcia. Cel ten jest realizowany przez zastosowanie uproszczonych, *analogowych* modeli eksperymentalnych różnych technologii odlewniczych. Zastosowane modele procesów technologicznych nie są prostymi odwzorowaniami rzeczywistości tylko pewnymi analogami procesów, wykorzystując ciecze modelowe i takie warunki fizyczne realizacji technologii, które umożliwiają wprowadzenie metod optycznych do diagnostyki przepływów. Stąd, naczynia będące uproszczonymi odpowiednikami urządzeń stosowanych w wybranych technologiach, wykonano z polimetakrylanu metylu (popularnie nazwanego pleksi), a wybrane ciecze były przezroczyste i charakteryzowały się niską temperaturą krzepnięcia. Zastosowanie cyfrowych metod rejestracji i analizy obrazów przepływu, takich jak, anemometria obrazowa (ang. *Particle Image Velocimetry*), termometria obrazowa (ang. *Particle Image Thermometry*) i śledzenie torów cząstek znacznikowych (ang. *Particle Tracking*) pozwoliły na precyzyjny pomiar pól temperatur i prędkości, wyznaczenie linii prądu w przepływie i dokładną lokalizację frontu przemiany fazowej. Zgromadzony bogaty materiał empiryczny posłużył do porównań z danymi uzyskanymi w modelowaniu numerycznym badanych przypadków. Przyjęto

zasadę, że dla tworzonych własnych modeli eksperymentalnych przeprowadzono również własne symulacje numeryczne, oparte na uniwersalnym oprogramowaniu. Takie podejście pozwalało na bieżące rozpoznawanie zjawisk fizycznych w eksperymencie, dobieranie warunków optymalnego przebiegu eksperymentu i określenie, jakie charakterystyki fizyczne i w jakiej postaci powinny być rejestrowane i opracowane podczas badań, aby mogły służyć do weryfikacji modelu numerycznego. Z drugiej strony analiza warunków laboratoryjnych umożliwiała takie modyfikacje modelu numerycznego, aby opierał się on na rzeczywistych warunkach brzegowych i początkowych.

Dla typowego procesu odlewniczego można wyróżnić dwie podstawowe fazy, fazę przepływową – dominującą podczas wypełniania formy ciecżą – i fazę krzepnięcia (solidyfikacji) ciecży. Każda z tych faz ma istotny wpływ na produkt końcowy. Z uwagi na różną specyfikę zjawisk fizycznych w każdej z tych faz, w prowadzonych badaniach starano się rozdzielić te dwa etapy.

Proces odlewniczy charakteryzuje jednoczesne występowanie szeregu procesów fizycznych, których wzajemne sprzężenie decyduje o rezultacie końcowym. Jednoczesne występowanie konwekcji naturalnej i wymuszonej, swobodnej powierzchni i wielu frontów przemiany fazowej komplikuje analizę eksperymentalną i utrudnia przeprowadzenie procedury walidacyjnej. Dlatego przy tworzeniu wzorców eksperymentalnych, mających na celu weryfikację kodów numerycznych, podstawowym kryterium wyboru konfiguracji musi być ograniczenie stopnia komplikacji badanego procesu. Uproszczenie geometrii naczynia jest tu koniecznym warunkiem dla jednoznacznej analizy pól prędkości i położenia frontów fazowych. Przedmiotem zainteresowania w obecnej pracy są więc proste geometrie (sześciian i prostopadłościan) wypełniane ciecżą grawitacyjnie lub pod ciśnieniem.

Po wypełnieniu modelu, kiedy zanika przepływ wymuszający, istotną rolę zaczynają odgrywać przepływy termiczne wywołane gradientami temperatury: konwekcja naturalna i konwekcja termokapilarna. Przepływy te wpływają na nierównomierność procesu krzepnięcia oraz deformacje powierzchni przemiany fazowej. Zbadanie charakterystyk tych przepływów w połączeniu z analizą położenia frontu fazowego jest kolejnym etapem przeprowadzonej analizy procesu krzepnięcia.

Mimo dążenia do prostoty kształtów geometrycznych naczyń wykorzystywanych do badań, nie da się uniknąć znacznej złożoności obserwowanego zjawiska. Przykładowo oddziaływanie swobodnej powierzchni ciecży z prostymi wewnętrznymi przeszkodami umieszczonymi w geometrii prostopadłościanu powoduje, że wypełnianie połączone jest z procesem przelewania, powstawania fal powierzchniowych i wtórnej cyrkulacji wielo-komorowej. Analiza eksperymentalna takich przepływów jest utrudniona wskutek dużej rozpiętości występujących prędkości oraz załamań światła na przeszkodach wewnętrznych i swobodnej powierzchni ciecży. Z kolei przy wypełnianiu geometrii w formie sześcianu generowana jest silna cyrkulacja wewnętrzna, prowadząca do deformacji powierzchni swobodnej. Utrudnia to obserwacje wnętrza naczynia przez górną powierzchnię. Podobną przeszkodą w pomiarach staje się krzepnięcie ciecży na zimnych ściankach bocznych tego modelu. Tym niemniej wyselekcjonowane dane eksperymentalne pozwoliły na zdefiniowanie wzorca procesu wypełniania naczynia, wzorca procesu krzepnięcia dla naczynia wypełnionego oraz wzorca dla sprzężenia procesów wypełniania i krzepnięcia.