



POLITECHNIKA ŚLĄSKA

SZKOŁA DOKTORÓW

DYSCYPLINA NAUKOWA

INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA

Rozprawa doktorska

Optymalizacja konstrukcji wzbudnika do topienia metali z
wykorzystaniem lewitacji elektromagnetycznej.

Autor: mgr inż. Błażej Nycz

Promotor: dr hab. inż. Roman Przyłucki, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Maliński

Gliwice, 2024

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Obiekt pracy	1
2	Zastosowanie elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego metali	3
2.1	Historia Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego	3
2.2	Topienie metali trudno topliwych	5
2.3	Proces krzepnięcia	7
2.4	Pomiary właściwości termo-fizycznych	10
2.5	Nanomateriały i wysoko wydajna produkcja materiałów	14
2.6	Badania termo-chemiczne	15
2.7	Modelowanie Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego dla stałego wsadu	18
2.8	Modelowanie Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego dla stopionego wsadu	21
2.9	Badania wpływu zmiany kształtu wzbudnika na parametry procesu	24
3	Cel, teza i zakres pracy	30
3.1	Cel i teza	30
3.2	Zakres pracy	31
3.3	Układ pracy	32
4	Wstęp teoretyczny	35
4.1	Opis pola elektromagnetycznego	35
4.1.1	Model pola elektromagnetycznego	35
4.1.2	Siła wznosząca	37
4.2	Opis pola temperatury	39
4.2.1	Uproszczona analiza temperatury wsadu	39
4.2.2	Pole temperatury	40
4.3	Dynamika płynów	43
4.3.1	Ośrodki ściśliwe	43
4.3.2	Ośrodki nieściśliwe	45
4.4	Przegląd metod optymalizacji	46
4.4.1	Przeszukiwanie lokalne	46
4.4.2	Przeszukiwanie globalne	54

5	Modele obliczeniowe	65
5.1	Wybór geometrii wzбудnika	65
5.2	Model EM	68
5.2.1	Oprogramowanie i platforma sprzętowa	68
5.2.2	Geometria	69
5.2.3	Warunki początkowe	70
5.2.4	Warunki brzegowe	71
5.2.5	Jakość dyskretyzacji	71
5.3	Model EM-T	72
5.3.1	Założenia wstępne	72
5.3.2	Oprogramowanie	72
5.3.3	Przepływ danych	73
5.3.4	Analiza i warunki brzegowe pola elektromagnetycznego	75
5.3.5	Analiza i warunki brzegowe pola termicznego	77
5.3.6	Dynamika płynów i warunki brzegowe dla przepływu powietrza	79
5.3.7	Jakość dyskretyzacji	79
5.4	Model EM-T-FD	81
5.4.1	Założenia wstępne	81
5.4.2	Submodele	82
5.4.3	Przepływ danych	83
6	Stanowisko pomiarowe i metodyka pomiarów	85
6.1	Stanowisko pomiarowe	85
6.2	Metodyka pomiarów	87
7	Wstępne badania EM	89
7.1	Opis problemu	89
7.2	Wyniki ze wstępnych badań EM	90
7.2.1	Siły	90
7.2.2	Moc indukowana i dostarczana	95
7.2.3	Analiza wybranego wariantu	99
7.3	Wnioski wynikające ze wstępnych badań EM	100
8	Badania EM-T	102
8.1	Przygotowanie modelu i weryfikacja pomiarowa	102
8.1.1	Opis problemu	102
8.1.2	Metodyka badania	102
8.1.3	Wyniki	105
8.1.4	Wnioski z weryfikacji modelu	110
8.2	Optymalizacja wzбудnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego dla kulistego wsadu	110
8.2.1	Opis problemu	110
8.2.2	Funkcja celu, zmienne i ograniczenia	111
8.2.3	Przestrzeń rozwiązań	113

8.2.4	Wybór algorytmu optymalizacyjnego	115
8.2.5	Algorytm ewolucyjny	116
8.2.6	Wyniki optymalizacji wzbudnika dla stałego wsadu w kształcie kuli	120
8.2.7	Wnioski z optymalizacji wzbudnika dla stałego wsadu w kształcie kuli	121
8.3	Eksperymentalne porównanie charakterystyk dla dwóch wybranych wzbudników do topienia lewitacyjnego	122
8.3.1	Opis problemu	122
8.3.2	Wyniki pomiarów	122
8.3.3	Wnioski z porównania charakterystyki obu wzbudników	124
8.4	Wykorzystanie tytanowego wsadu w ETL	125
8.4.1	Opis problemu	125
8.4.2	Wyniki analizy pozycji wsadu oraz natężenia prądu	126
8.4.3	Wyniki analizy termicznej wsadu	127
8.4.4	Wnioski związane z wykorzystaniem tytanowego wsadu	130
9	Badania EM-T-FD	131
9.1	Modelowanie deformacji wsadu	131
9.1.1	Opis problemu	131
9.1.2	Wyniki symulacji	132
9.1.3	Wnioski z modelowania deformacji wsadu	133
9.2	Optymalizacja geometrii wzbudnika dla wsadu po stopieniu	134
9.2.1	Opis problemu	134
9.2.2	Funkcja celu, zmienne i ograniczenia	135
9.2.3	Próbkowanie przestrzeni rozwiązań	136
9.2.4	Optymalizacja wzbudnika dla wsadu w stanie ciekłym	136
9.2.5	Metodyka optymalizacji	139
9.2.6	Wyniki optymalizacji wzbudnika dla wsadu w stanie ciekłym	140
9.2.7	Wnioski z optymalizacji wzbudnika dla wsadu w stanie ciekłym	141
10	Podsumowanie	142
	Bibliografia	148
A	Pseudokod algorytmu ewolucyjnego	171

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Obiekt pracy

W celu stopienia specyficznej grupy metali np. o wysokiej temperaturze topienia, metali trudnotopliwych lub wymagających wysokiej czystości należy stosować specyficzne metody. Jedną z nich jest Elektromagnetyczne Topienie Lewitacyjne, jest to technika pozwalająca na topienie materiałów przewodzących prąd elektryczny bez kontaktu z tygłem. Metoda ta opiera się na indukowaniu prądów wirowych w próbce metalowej przez zmienne pole elektromagnetyczne. Te prądy wirowe ogrzewają próbkę indukcyjnie, wytwarzając jednocześnie siły elektromagnetyczne. Gdy pole jest generowane przez odpowiednio ukształtowany wzbudnik, siły te mogą osiągnąć wystarczającą wielkość, aby lewitować elektromagnetycznie próbkę [17]. Zaletami takiego procesu są:

- Próbka może być zawieszona w stanie ciekłym przez dłuższy czas bez kontaktu z innym materiałem.
- W próbce nie występują znaczne różnice temperatur.
- Próbka jest dokładnie mieszana elektromagnetycznie w stanie ciekłym.

Wadą jest górna granica wielkości stopionej próbki ustalona przez stosunek napięcia powierzchniowego do gęstości [134]. Dlatego też elektromagnetyczne topienie lewitacyjne stanowi doskonałą metodę do topienia małych próbek materiałów o: wysokiej temperaturze topienia, reaktywnych i wymagających wysokiej czystości. Ze względu na stosunkowo niską sprawność procesu celowe są działania w kierunku zwiększenia

sprawności procesu. Aby zwiększyć sprawność procesu, potrzeba zbadać wpływ parametrów związanych ze wzбудnikiem, wsadem i źródłem prądu na siłę wyporu i moc czynną generowaną we wsadzie [67].

Rozdział 2

Zastosowanie elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego metali

2.1 Historia Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego

Podstawowe założenia Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego (ETL) przedstawiono w sekcji 1.1.

Użycie elektromagnetycznej lewitacji do topienia metali zostało zaproponowane przez O. Mucka już w 1923 roku [76]. Jednak z powodu braku dostępu do odpowiedniego sprzętu w laboratoriach do generatora prądu o wysokim natężeniu, niskim napięciu i jednocześnie wysokiej częstotliwości, przez pierwsze 30 lat ta technika nie była rozwijana.

Dopiero po tym czasie pojawili się naukowcy, którzy zajęli się dalszą pracą nad ETL. W 1952 roku tematem zajął się E.C. Okress z zespołem [84]. W ramach ich pracy zidentyfikowano problem zanieczyszczenia metali podczas topienia w tyglach, szczególnie w przypadku metali reaktywnych. Następnie rozważono alternatywne metody lewitacji metali: magnetostatyczną, elektromagnetyczną i akustyczną. Wybrano metodę lewitacji elektromagnetycznej jako najbardziej obiecującą i w dalszej części skupiono się na niej. Przeprowadzono początkowe eksperymenty lewitacji wsadu z pojedynczym zwojem, a następnie z dwoma zwojami współosiowymi. Eksperymenty z pojedynczym zwojem wykazały, że lewitacja metali jest możliwa, ale lewitacja metali stopionych by-

ła niestabilna. Z kolei rozwiązanie wykorzystujące dwa zwoje wzbudnika współosiowe umożliwiło stabilną lewitację metali stopionych. Na kolejnym etapie potwierdzono, że metoda ETL jest możliwa zarówno w powietrzu, jak i w próżni. Podczas eksperymentu potwierdzono mieszanie elektromagnetyczne stopionego materiału, a następnie możliwość jego schłodzenia poniżej temperatury topienia podczas lewitacji.

Matematyczną analizę ETL przeprowadzili W. Brisley i B. S. Thornton w 1963 roku [17]. Badania dotyczyły rozważań teoretycznych nad lewitacją obiektów za pomocą pól elektromagnetycznych. Przedstawione ówczesne zastosowania wykorzystujące rozważane zjawiska, takie jak bezkontaktowe topienie metali czy łożyska nisko-tarciowe. Następnie rozważono stabilność lewitacji, artykuł wspomina o pracach nad systemami mogącymi utrzymać zarówno ciała stałe, jak i ciecze. Dalsze badania skupiały się na teoretycznych podstawach unoszenia się wsadu, a konkretnie na sile lewitacji powstającej w systemach wykorzystujących pole elektromagnetyczne o symetrii osiowej. Rozważono również role prądów wirowych indukowanych w przewodzącym obiekcie przez pole elektromagnetyczne, które to prądy oddziałują z polem i przyczyniają się do powstania siły wznoszącej wsad.

Teoretyczne rozważania problemu przedstawione przez innych badaczy stanowiły podstawę do pracy E. Fromma i H. Jehn w 1965 roku [41]. Wyniki ich eksperymentów potwierdziły poprawność obliczeń dotyczących sił wznoszących wsad i absorbowanej mocy przy uwzględnieniu pewnych uproszczeń. Dotychczasowa wiedza na temat wpływu parametrów geometrycznych i elektrycznych na proces lewitacji pozwalała na systematyczne dostosowanie układu eksperymentalnego do konkretnych problemów badawczych. Zmieniając kształt wzbudnika, rozmiar próbki oraz wielkość i częstotliwość prądu we wzbudniku, można kontrolować proces topienia i nagrzewania wsadu. Zastosowanie niskiej częstotliwości pozwala na obniżenie temperatury próbki, ale wymaga wyższego natężenia prądu we wzbudniku, co prowadzi do większych strat energetycznych. Kombinacja niskiej częstotliwości z dodatkowymi pętlami wysokoczęstotliwościowego wzbudnika umożliwia szeroki zakres regulacji temperatury próbki poprzez zmiany prądu wysokoczęstotliwościowego.

Przydatność ETL została szybko zauważona przez badaczy materiałów. C. Saxena w 1968 roku [105] przeprowadziła badania, których wyniki wykazały, że lewitacyjne topienie jest obiecującą metodą wytwarzania stopów cyrkonu i niobu. Stwierdzono, że na wytwarzanie tych stopów mają wpływ różne czynniki, takie jak kształt wzbudnika, odległość między zwojami, atmosfera w komorze topienia oraz wielkość i kształt wsadu

topienia.

Współczesne zastosowania ETL obejmują wiele obszarów, zarówno w warunkach ziemskich, jak i mikrograwitacyjnych. A. Seidel i in. opisali urządzenia ETL stosowane na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) [107].

Najpopularniejsze zastosowania ETL obejmują tematykę:

- topienia metali trudnotopliwych,
- procesu krzepnięcia,
- pomiaru właściwości termo-fizycznych,
- wytwarzania nanomateriałów,
- badań termochemicznych.

2.2 Topienie metali trudnotopliwych

Postęp technologiczny wymaga stosowania coraz doskonalszych materiałów. Jednak ich wykorzystanie jest często utrudnione przez cenę i trudności technologiczne związane z przetwarzaniem nowych materiałów. Typowymi przykładami tego typu materiałów są metale trudnotopliwe. W zależności od przyjętej definicji należą do nich niob, molibden, tantal, wolfram i ren, a także tytan, wanad, chrom, mangan, cyrkon, ruten, rod, hafn, osm i iryd. Charakteryzują się one wysoką temperaturą topienia, wysoką wytrzymałością mechaniczną i ogólną odpornością na zużycie. Są szeroko stosowane w czystej postaci [48, 92], ale także jako stopy [35, 42] lub dodatki stopowe [77]. Materiały te stają się coraz szerzej stosowane, co skutkuje poszukiwaniem tańszych metod produkcji tych metali i ich stopów, a także technologii wytwarzania produktów końcowych. Podstawowa zaleta tych metali (tj. wysoka temperatura topienia) stanowi również poważny problem w ich przetwarzaniu. Obecnie wszystkie metody topienia tych metali bazują na energii elektrycznej. Stosowane są następujące techniki: przetapianie łukowe (elektroda z przetopionego materiału) [51, 83, 102, 121], topienie plazmowe [36, 121], topienie wiązką elektronów [27, 121, 133], topienie w zimnym tyglu [75, 78], topienie indukcyjne [38] i topienie przy użyciu ETL [91, 115]. Niektóre metale, takie jak tytan, są szczególnie trudne w obróbce cieplnej, ponieważ są bardzo reaktywne w wysokich temperaturach, co prowadzi do zanieczyszczenia. Obecnie metale i stopy o wysokiej

wytrzymałości i wysokich temperaturach topienia są coraz częściej wykorzystywane w wielu zastosowaniach.

Ze względu na wysoką wytrzymałość i niską gęstość, tytan i jego stopy są wykorzystywane w lotnictwie i technologiach kosmicznych (jako materiał konstrukcyjny dla płatowców i kapsuł), a także w budowie maszyn i technologiach wojskowych. Ponadto odporność tytanu na wysokie temperatury sprawia, że nadaje się on do stosowania w budowie silników lotniczych (łopatek turbin) [150], a jego biokompatybilność sprawia, że nadaje się do stosowania w opiece zdrowotnej [46, 79]. W przypadkach, w których wymagana jest odporność na ekstremalne temperatury, stosowane są stopy wolframu, których wadą jest ich wysoka gęstość (reaktory termojądrowe, silniki raketowe i odrzutowe oraz ogólnie produkty mające kontakt z plazmą) [44, 96]. Wykorzystanie tytanu i jego stopów jest od dawna znanym problemem technologicznym, związanym głównie z obróbką skrawaniem i obróbką cieplną [8]. Źródłem tych problemów jest nie tylko jego wysoka twardość i znikome przewodnictwo cieplne, ale także wysoka temperatura topienia i wysoka reaktywność w wysokich temperaturach [94, 97]. Ta ostatnia właściwość utrudnia utrzymanie czystości tytanu podczas obróbki cieplnej i trudno jest uzyskać stopy tytanu o precyzyjnym składzie [136]. Stopy tytanu są otrzymywane na dużą skalę w piecach łukowych i na nieco mniejszą skalę w piecach indukcyjnych z zimnym tygłem [88, 145], ale w obu przypadkach tylko część wsadu pieca ma wysoką czystość, podczas gdy reszta może być zanieczyszczona [29]. Zimne palenisko jest stosowane w celu zmniejszenia zanieczyszczenia tytanu podczas przetapiania łukowego, a podobna technika jest stosowana do topienia indukcyjnego w zimnym tyglu [20]. Stopiony tytan styka się z intensywnie chłodzoną podstawą pieca, gdzie jego warstwa powierzchniowa zestala się i tworzy tytanową powłokę, która zapobiega dalszemu zanieczyszczeniu. Rozwiązanie to, oprócz strat materiałowych, powoduje również trudności technologiczne, jeśli topienie jest etapem wstępnym przed procesem odlewania. Mianowicie, ze względu na intensywne chłodzenie, trudno jest osiągnąć wymagany stopień przegrzania wsadu.

Ze względu na swój charakter, procesem, który umożliwia topienie bez kontaktu z "otoczeniem" jest topienie przy użyciu lewitacji elektromagnetycznej [10, 13, 123]. Z tego powodu doskonale nadaje się do zastosowań związanych z topieniem metali trudnotopliwych.

2.3 Proces krzepnięcia

W przypadku braku tygla lewitujące krople mogą ulec znacznemu przechłodzeniu, a proces nukleacji jest wolny od efektów związanych z kontaktem ze ścianami trudnotopliwymi. Pozwala to na zbadanie wielu unikalnych zjawisk związanych z krzepnięciem, w tym stopnia przechłodzenia, prędkości krzepnięcia, selekcji faz, i morfologii.

Przy użyciu odpowiedniej kamery można bezpośrednio obserwować prędkość frontu krzepnięcia lewitowanej kropli, rejestrując ruch jawnego interfejsu ciało stałe-ciecz. Ciepło utajone generowane podczas krzepnięcia podnosi temperaturę fazy zestalonej, dzięki czemu jest możliwy pomiar maksymalnej szybkości wzrostu fazy stałej. Na podstawie pomiaru maksymalnej szybkości wzrostu podczas procesu krzepnięcia można określić kinetykę wzrostu kryształów głęboko schłodzonego stopu [46]. Poniżej przedstawiono najważniejsze prace, które powstały w ostatnich latach w tej tematyce.

Badania przedstawione przez C. Nietthoff i innych [80] skupiają się na zastosowaniu techniki lewitacji elektromagnetycznej do schładzania topionych materiałów bez użycia naczyń, aby dostęp do stanu metastabilnego topionego materiału, co umożliwia formowanie faz metastabilnych o strukturach krystalicznych różniących się od ich stabilnych odpowiedników. W połączeniu z dyfrakcją promieniowania rentgenowskiego z synchrotronu technika ta umożliwia badanie *in situ* szybkiego krystalizowania schłodzonych stopów $Ni-V$. Wybrano binarny stop $Ni-V$ jako system modelowy, ponieważ prezentuje on konkurencję faz pomiędzy trzema różnymi fazami krystalograficznymi: przestrzennie centrowaną, ściennie centrowaną i fazą międzymetaliczną o strukturze tetragonalnej przy pośrednich stężeniach. Eksperymenty dyfrakcyjne umożliwiły bezpośrednią identyfikację różnych faz krystalicznych powstałych ze stanu nierównowagowego stopionego materiału. Badano selekcję faz w funkcji temperatury podchłodzenia dla stopów $Ni - V$ o różnych stężeniach.

Praca napisana przez J. Lee z zespołem [66] opisuje rozwój modelu magnetohydrodynamicznego do analizy wewnętrznej konwekcji w stopionych kroplach $Co - Cu$, które są lewitowane elektromagnetycznie przy użyciu techniki nazywanej ground-based electromagnetic levitation. Autorzy skoncentrowali się na rozwiązaniu uproszczonych równań Maxwella, aby obliczyć pole elektromagnetyczne generowane przez wzbudniki miedziane, a uzyskana siła elektrodynamiczna na jednostkę objętości została wykorzystana jako źródło pędu w równaniach Naviera-Stokesa. Model ten został zastosowany w różnych warunkach, przy których lewitowano krople, aby przedstawić maksymal-

ną prędkość przepływu i współczynnik ścinania jako funkcję wielomianową napięcia grzewczego, gęstości, lepkości i przewodności elektrycznej stopionych materiałów.

Z kolei artykuł autorstwa R. P. Liu ze współpracownikami [70] przedstawia eksperymenty związane z przechłodzeniem i krystalizacją krzemowych próbek o średnicy około 10 mm przy użyciu metody lewitacji elektromagnetycznej. Próbki Si zostały przygotowane przez łukowe topienie z czystych krzemowych brył o czystości 99,9995%. Eksperymenty przechłodzenia przeprowadzono w specjalnie skonstruowanej komorze lewitacji elektromagnetycznej, która początkowo była w warunkach próżniowych, a następnie została napełniona argonem. Dzięki tej metodzie osiągnięto przechłodzenie do 330 K przed krystalizacją dla próbek o rozmiarach zbliżonych do 10 mm. Obserwowano przejście od wzrostu sfacowanego przy niższych przechłodzeniach do ciągłego wzrostu przy wyższych przechłodzeniach, co zostało zanalizowane poprzez obserwację zmian morfologii faz na powierzchni próbek.

W pracy napisanej przez R. V. S. Prasad i G. Phanikumar [93] skupiono się na analizie mikrostruktury i właściwości stopu Heuslera, który został przechłodzony i skryształizowany w urządzeniu do lewitacji elektromagnetycznej. Badanie mikrostruktury wykazało, że próbki składają się z mieszaniny fazy przestrzennie centrowanej oraz nie-modulowanej fazy martenzytu tetragonalnego przy niskich przechłodzeniach, a także jednofazowej struktury przy określonych warunkach. Artykuł sugeruje, że metoda przechłodzenia elektromagnetycznego może być istotna dla zrozumienia i kontrolowania ewolucji faz i właściwości tego rodzaju stopów Heuslera, które są znane jako ferromagnetyczne stopy o pamięci kształtu. Te stopy mają zastosowanie w różnych dziedzinach, jednak borykają się z problemami takimi jak niska plastyczność, wysokie koszty i trudności w procesie produkcji, takie jak utrata manganu.

G. H. Fan i inni [37] badali mechanizmy wzrostu zorientowanego podczas procesu rekryształizacji, skupiając się na analizie trójwymiarowej. Badacze zbadali, jak orientacja dostępnych jąder (tj. jąder, które się utworzyły) oraz mikrostruktura deformacji, w której rosną, wpływają na proces rekryształizacji. W badaniach wykorzystano techniki takie jak sekcjonowanie seryjne w połączeniu z dyfrakcją elektronów wstecznie rozproszonych do charakteryzacji jąder w trzech wymiarach. Zwrócono uwagę na to, że mobilność granic ziaren zależy od niezgodności orientacji przez granicę. Badania te wykorzystują próbki trójkryształowe aluminium, a ilustracje zawarte w artykule prezentują geometrię trójkryształu oraz kierunek wzrostu wzdłuż wybranej osi kryystalograficznej. Analiza ta ma na celu głębsze zrozumienie i przedstawienie złożonych

mechanizmów wzrostu zorientowanego w trakcie rekrytalizacji, co ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia i kontrolowania procesów rekrytalizacji w różnych materiałach.

Silne mieszanie wewnątrz kropli podczas ETL będzie miało wpływ na proces krzepnięcia. Należy więc rozważyć wpływ turbulentnego przepływu cieczy na proces krystalizacji. Badanie prezentowane przez S. Bindera z zespołem [12] koncentrują się na analizie wpływu przepływu płynu na dynamikę wzrostu kryształów podczas krzepnięcia tetragonalnego Ni_2B z przechłodzonego stopu. Różnorodne techniki eksperymentalne zostały zastosowane do wygenerowania zróżnicowanych prędkości przepływu płynu w próbkach przechłodzonych, w tym lewitacja elektromagnetyczna w warunkach 1 G (1 G ETL) i w warunkach zmniejszonej grawitacji (μ G ETL). Obserwacja propagacji interfejsu ciało-płyn na powierzchni krzepnących próbek została zrealizowana za pomocą szybkich nagrań wideo, a bezdotkowy pomiar przechłodzenia przed krzepnięciem został zrealizowany przy użyciu pirometrii podczerwieni. Zauważono, że przepływ płynu ma znaczący wpływ na kinetykę wzrostu kryształów. Jak wykazał rozszerzony model ostrych interfejsów, ten efekt jest głównie przypisywany znaczącej zmianie w kinetyce wzrostu kryształów spowodowanej przez konwekcję indukowaną przejściem od dendrytów do bardziej sfacelowanych struktur krzepnięcia.

W badaniach przedstawionych przez C. Yang i J. Gao [144] zbadano kinetykę wzrostu dendrytycznego oraz zjawisko pułapkowania nieporządku w międzymetalicznym związku Ni_3Sn pod wpływem statycznego pola magnetycznego. Stopy Ni_3Sn zostały przechłodzone przy użyciu techniki szklowania przy obecności i braku statycznego pola magnetycznego o wartości 1 T. Prędkości wzrostu dendrytycznego w przechłodzonych stopach zostały zmierzone poprzez in-situ monitoring procesu recalescence przy użyciu kamery o wysokiej prędkości. Zmierzone prędkości wzrostu wykazały gwałtowny wzrost w krytycznym zakresie przechłodzenia.

Przy mieszaniu elektromagnetycznym i różnych szybkościach chłodzenia, morfologie separacji w lewitowanych próbkach znacznie różniły się od tych obserwowanych w próbkach poddanych analizie termicznie różnicowej [23]. Aby dokładniej zbadać te zjawiska, porównano struktury niedochłodzonych stopów $Cu_{85}Cr_{15}$ zestalonych w różnych warunkach [153]. Wyniki ujawniły, że silne mieszanie podczas ETL przyczyni się do powstania jednolitych dendrytów bogatych w Cr, które są zgodne ze strukturami powstałymi podczas szybkiego krzepnięcia stopu $Cu_{60}Co_{30}Cr_{10}$ [146].

Technika ETL została również wykorzystana do zbadania innych interesujących zjawisk, w tym "Krótkodystansowego uporządkowania" w przechłodzonych cieczach

metalicznych, które prowadzi do wysokiego poziomu przechłodzenia i silnie wpływa na właściwości fizyczne i zachowanie się w stanie krzepnięcia przechłodzonych cieczy. Ponieważ przechłodzone próbki znajdują się w stanie metastabilnym, obserwacja uporządkowania krótkiego zasięgu nie jest łatwa. Holland-Moritz i in. opracowali system ETL połączony z technikami dyfrakcyjnymi elastycznego rozpraszania neutronów i dyfrakcji rentgenowskiej z dyspersją energii (EDXD) wraz z promieniowaniem synchrotronowym w celu zbadania struktur uporządkowania krótkiego zasięgu w stopach [50]. Eksperymenty te dostarczyły pierwszego bezpośredniego dowodu doświadczalnego na istnienie ikozaedrycznej struktury uporządkowania krótkiego zasięgu w niechłodzonych stopach.

2.4 Pomiary właściwości termo-fizycznych

Poprzez rejestrowanie zmian powierzchni i częstotliwości oscylacji lewitujących kropeł w różnych temperaturach, można zmierzyć szeroki zakres właściwości powierzchni, w tym ciepło właściwe, emisyjność, rozszerzalność cieplną, gęstość, dyfuzyjność cieplną, oporność elektryczną, przewodność cieplną, napięcie powierzchniowe i lepkość. Eksperymenty zostały przeprowadzone zarówno w warunkach ziemskich jak i mikrograwitacyjnych.

Artykuł autorstwa H. Fujii z zespołem [43] dotyczy pomiaru napięcia powierzchniowego stopionego krzemu za pomocą dwóch metod: mikrograwitacyjnej metody oscylującej kropli oraz udoskonalonej metody kropli siedzącej w warunkach mikrograwitacji. Badanie ma na celu dokładne określenie napięcia powierzchniowego krzemu w stanie stopionym, co jest kluczowe dla zrozumienia i optymalizacji procesów przetwarzania materiałów, takich jak elektromagnetyczne topienie lewitacyjne. Metoda mikrograwitacyjna, wykorzystywana w warunkach niewielkiej grawitacji, pozwala na minimalizację wpływu sił grawitacyjnych na kształt i dynamikę kropli. Udoskonalona metoda kropli siedzącej, stosowana na Ziemi, została zoptymalizowana do precyzyjnych pomiarów napięcia powierzchniowego. Wyniki uzyskane obiema metodami dostarczają wartościowych danych dla przemysłu materiałowego, w szczególności dla procesów związanych z wytwarzaniem i przetwarzaniem krzemu. Badanie to podkreśla znaczenie precyzyjnych pomiarów w rozwoju technologii materiałowych, a także potencjalne zastosowania w inżynierii materiałowej i procesach produkcyjnych.

W badaniach przeprowadzonych przez I. Egry i inni [34], koncentruje się na pomia-

rach termofizycznych właściwości materiałów przetworzonych podczas lewitacji elektromagnetycznej w przestrzeni kosmicznej. Badanie to eksploruje potencjał ETL w mikrogravitacji dla precyzyjnych pomiarów właściwości termofizycznych, takich jak przewodność cieplna, gęstość, a także lepkość i napięcie powierzchniowe ciekłych metali. Metodyka opiera się na wykorzystaniu unikatowych warunków mikrogravitacji, które umożliwiają formowanie kropli materiału w stanie płynnym, bez konieczności stosowania tygli, co eliminuje potencjalne zanieczyszczenia wsadu. Wyniki badań wskazują na wysoką dokładność i powtarzalność pomiarów, co jest kluczowe dla zrozumienia termofizycznych właściwości materiałów w ekstremalnych warunkach, jakie panują w przestrzeni kosmicznej. Wyniki te mają znaczące implikacje dla przyszłych badań materiałowych w kosmosie oraz mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia procesów topienia i krzepnięcia w mikrogravitacji.

Wyniki przedstawione przez S. Amore i współpracowników [7] dotyczą pomiaru napięcia powierzchniowego płynnych stopów $Cu-Ti$ przy użyciu techniki elektromagnetycznego lewitowania. W badaniu zastosowano metodę oscylacyjną do określenia napięcia powierzchniowego. Dodatkowo autorzy opracowali model termodynamiczny, by przewidzieć napięcie powierzchniowe stopów. Wyniki pomiarów i modelowania termodynamicznego zostały porównane, wykazując zgodność i dostarczając głębszego zrozumienia wpływu składu stopu na jego właściwości powierzchniowe. Praca ta wnosi znaczący wkład w zrozumienie właściwości powierzchniowych stopów $Cu-Ti$, co ma znaczenie dla ich zastosowań przemysłowych, w tym w technologii lotniczej i kosmicznej.

Artykuły autorstwa K. Zhou z zespołem [151–153], koncentruje się na badaniu termofizycznych właściwości znacząco podchłodzonego ciekłego stopu $Ti - Al - Nb$ za pomocą lewitacji elektromagnetycznej. Metodologia badań obejmowała zastosowanie techniki lewitacji elektromagnetycznej do podchłodzenia i utrzymania stopu w stanie ciekłym bez fizycznego kontaktu z jakimkolwiek pojemnikiem, co minimalizuje zanieczyszczenie i wpływ ścianek naczynia na próbkę. Kluczowe wyniki badań obejmują precyzyjne pomiary właściwości termicznych, takich jak gęstość, przewodność cieplna i lepkość ciekłego stopu $Ti - Al - Nb$ w różnych temperaturach. Wyniki te mają znaczenie dla zrozumienia zachowania stopów w stanie znacznego podchłodzenia, co jest istotne w kontekście procesów przetwórstwa materiałów i inżynierii materiałowej. Badanie dostarcza wartościowych danych do modeli symulacyjnych oraz może mieć znaczący wpływ na rozwój nowych technologii wytwarzania i przetwarzania stopów metali lekkich.

W swojej publikacji J. Brillo i inni [16] przedstawiają wyniki dotyczące pomiarów napięcia powierzchniowego ciekłych stopów $Ag - Cu$. Badanie to ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia właściwości międzyfazowych tych stopów, co jest istotne w wielu procesach przemysłowych, w tym w elektromagnetycznym topieniu lewitacyjnym. W pracy tej zastosowano metodę oscylacyjną z wykorzystaniem kropli lewitującej w polu elektromagnetycznym. Wyniki badań wskazują na specyficzne zmiany napięcia powierzchniowego w zależności od składu stopu, co ma bezpośredni wpływ na zachowanie materiału w stanie ciekłym. W pracy podkreślono również znaczenie tych wyników dla zrozumienia procesów mieszania i formowania w technologiach przetwarzania metali. Badanie to przyczynia się do głębszego zrozumienia fizykochemicznych właściwości stopów $Ag - Cu$, co ma istotne implikacje dla ich zastosowań przemysłowych.

Analizując pracę R. Kurosawy i współpracowników [64] można znaleźć informacje na temat pomiaru normalnej emisyjności widmowej stopionego miedzi przy użyciu lewitatora elektromagnetycznego z nałożonym statycznym polem magnetycznym. W pracy tej zastosowano innowacyjną metodologię polegającą na kombinacji lewitacji elektromagnetycznej z zewnętrznym statycznym polem magnetycznym, aby stabilizować kroplę stopionego metalu. Badanie koncentruje się na dokładnym pomiarze emisyjności widmowej, która jest kluczowym parametrem w określaniu właściwości termofizycznych metali w stanie ciekłym. Wyniki badań wskazują, że nałożenie statycznego pola magnetycznego znacząco poprawia stabilność kropli i pozwala na dokładniejsze pomiary emisyjności. To badanie ma znaczenie dla przemysłu metalurgicznego, oferując lepsze zrozumienie właściwości cieplnych metali w stanie ciekłym oraz udoskonalając techniki ich przetwarzania.

H. Kobatake z zespołem [60] w swoim badaniu zajmuje się pomiarami normalnej emisyjności spektralnej stabilnego i nadchłodzonego ciekłego krzemu przy użyciu elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego w polu magnetycznym stałoprądowym. Badacze skupili się na precyzyjnym określeniu charakterystyk emisyjności spektralnej ciekłego krzemu, który jest kluczowym materiałem w produkcji półprzewodników. Wyniki tego badania są istotne dla zrozumienia właściwości termofizycznych krzemu w stanie ciekłym, co ma znaczenie zarówno dla badań podstawowych, jak i zastosowań przemysłowych. Drugie badanie [61], przeprowadzone przez tę samą grupę badawczą, koncentruje się na pomiarach normalnej emisyjności spektralnej ciekłego żelaza i niklu, również przy użyciu elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego w polu magnetycznym stałoprądowym. W tym przypadku badacze skupili się na metalach przemysłowych o fundamentalnym znaczeniu dla metalurgii. Podobnie jak w przypadku krzemu, wyko-

rzystanie techniki lewitacyjnej umożliwiło precyzyjne badanie właściwości emisyjności bez bezpośredniego kontaktu z otoczeniem. Wyniki te mają duże znaczenie dla zrozumienia procesów termicznych i właściwości optycznych żelaza i niklu w stanie ciekłym, co jest istotne dla wielu zastosowań inżynierskich i metalurgicznych.

Praca autorstwa Y. Baby i innych [9] koncentruje się na pomiarze przewodności cieplnej stopionego miedzi przy użyciu lewitatora elektromagnetycznego z nakładanym statycznym polem magnetycznym. Użycie statycznego pola magnetycznego miało na celu dodatkową stabilizację próbki miedzi podczas pomiarów. Kluczowym wynikiem tego badania jest dokładny pomiar przewodności cieplnej stopionej miedzi, co ma istotne znaczenie dla zrozumienia jej właściwości termicznych i może mieć zastosowanie w przemyśle metalurgicznym oraz w badaniach nad materiałami wysokotemperaturowymi. Metodologia i wyniki tego eksperymentu przyczyniają się do lepszego zrozumienia zachowania metali w stanie stopionym i ich właściwości w kontekście przetwarzania materiałów.

Badanie właściwości termofizycznych w fazach ciekłych w podwyższonej temperaturze wymaga dokładnej wiedzy na temat ciśnienia parcjalnego tlenu, ponieważ utlenianie powierzchniowe i rozpuszczanie tlenu znacząco właściwości stopu. M. Körner i współpracownicy [65] zaprezentowali metodę kontroli częściowego ciśnienia tlenu w zakresie ppm, wykorzystującą system buforowy z dwóch tlenków metalu. Metodologia opiera się na precyzyjnym dostosowywaniu składu chemicznego bufora do osiągnięcia pożądanego ciśnienia tlenu. Wyniki wskazują na wysoką skuteczność tej metody w stabilizowaniu poziomu tlenu, co ma znaczące implikacje dla procesów wymagających precyzyjnej kontroli atmosfery, takich jak elektromagnetyczne topienie lewitacyjne.

Z kolei S. Ozawa z zespołem [87] przeprowadził badanie dotyczące wpływu częściowego ciśnienia tlenu na napięcie powierzchniowe stopionych stali nierdzewnych typu 304 i 316. Użyto metody oscylującej kropli w połączeniu z elektromagnetyczną lewitacją. Wyniki wskazują, że zmiany w częściowym ciśnieniu tlenu mają istotny wpływ na napięcie powierzchniowe tych stali, co ma duże znaczenie dla zrozumienia i optymalizacji procesów przetwarzania metali w stanie ciekłym.

Natomiast M. Schulz i inni [106] w swoim artykule koncentruje się na kontroli częściowego ciśnienia tlenu podczas eksperymentów w mikrograwitacji. Autorzy opracowali metodę umożliwiającą precyzyjną regulację ciśnienia tlenu, kluczową dla badań nad zachowaniem materiałów w stanie ciekłym w warunkach zmniejszonej grawitacji. Wyniki pokazują, że metoda ta może być efektywnie stosowana w eksperymentach

z elektromagnetycznym topieniem lewitacyjnym w środowisku mikrograwitacyjnym.

2.5 Nanomateriały i wysoko wydajna produkcja materiałów

ETL posiada również zastosowanie w przygotowywaniu nanomateriałów. Artykuł autorstwa A. Kermanpur i innych [58], przedstawia metodę jednoetapowej syntezy monodispersyjnych nanocząstek żelaza (Fe) przy użyciu procesu Kondensacji Gazowej z Lewitacją Elektromagnetyczną (KGLE). Metoda ta polega na kondensacji oparów Fe , które wznoszą się z wysokotemperaturowej, lewitującej kropli, przy użyciu kriogenicznej mieszaniny gazów He-Ar pod ciśnieniem atmosferycznym. Uzyskane nanocząstki miały kształt sferyczny, średnicę $72,1 \pm 19,5$ nm oraz wąskie rozkłady wielkości. Nanocząstki były pasywowane przez utworzenie cienkiej warstwy tlenków żelaza o grubości 3 nm. Tempo produkcji w procesie KGLE oszacowano na około 10 g/h

Badanie przedstawione przez M. Vaghayenagar i współpracowników [129], analizuje wpływ różnych parametrów procesu na synteze nanocząstek Zn . Praca ta koncentruje się na optymalizacji warunków procesowych w celu uzyskania optymalnych właściwości cząstek, w tym ich rozmiaru i dystrybucji. Następne dzieło tych autorów [130] koncentruje się na mechanizmie tworzenia nanoprętów ZnO przy użyciu metody kondensacji gazowej z elektromagnetyczną lewitacją. Autorzy opisują szczegółowo proces syntezy nanoprętów ZnO , wskazując na specyficzne warunki eksperymentalne i ich wpływ na morfologię oraz właściwości nanoprętów. W kolejnym artykule [131], przedstawiają metodę jednoetapowej syntezy nanocząstek ZnO przy użyciu elektromagnetycznej kondensacji gazowej. Szczególny nacisk położony jest na efektywność i prostotę tego procesu, co ma znaczenie dla produkcji masowej. Wszystkie te prace łączą się w obszarze elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego i kondensacji gazowej, podkreślając ich znaczenie w zaawansowanej syntezie materiałów nanostrukturalnych, zwłaszcza nanoprętów i nanocząstek ZnO .

W pracy M. Malekzadeh i M. Halali [72], badacze wykorzystali metodę KGLE do syntezy nanocząstek srebra. Proces ten polegał na stopieniu i stabilnym lewitowaniu kropelek srebra w temperaturze około $1130^{\circ}C$ przy użyciu płaskich Wzbudników w rurce krzemionkowej o średnicy 10 mm. Jako gazy nośne i medium chłodzące zastosowano argon, azot oraz hel. Morfologia i rozmiar cząstek były badane za pomocą

skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej, dyfrakcji rentgenowskiej, analizy rentgenowskiej energodispersyjnej oraz dynamicznego rozpraszania światła. Wyniki wykazały, że cząstki srebra miały wąskie rozkłady wielkości i były sferyczne, ze średnią wielkością cząstek około 60, 50 i 30 nm syntezowanymi odpowiednio w atmosferach Ar , N_2 i He .

Wyniki przedstawione przez A. V. Mohammadi i M. Halali [74], skupiają się na syntezie i charakterystyce czystych nanocząstek metalicznego tytanu. W pracy tej zastosowano metodę elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego w połączeniu z kondensacją gazową. Badacze skoncentrowali się na wytworzeniu czystych nanocząstek tytanu, analizując ich właściwości i strukturę za pomocą różnych technik charakterystyki. Kluczowym aspektem badania jest zastosowanie lewitacji elektromagnetycznej do uzyskania wysokiej czystości i kontrolowanych rozmiarów cząsteczek.

W swojej publikacji S. Chen z zespołem [25], opisuje syntezę i charakterystykę nanocząstek Ti_3Al przy użyciu metody lewitacji przepływowej. Praca ta prezentuje nowatorską metodę wytwarzania nanocząstek, która łączy elektromagnetyczne topienie lewitacyjne z technologią przepływową, co umożliwia efektywną i kontrolowaną produkcję nanocząstek Ti_3Al . Wyniki badań wykazują, że otrzymane nanocząstki mają jednorodny rozmiar i skład, co ma znaczenie dla ich potencjalnych zastosowań w różnych dziedzinach, w tym w inżynierii materiałowej i nanotechnologii.

J. S. Luo i inni [71] skupiają się na badaniu ewolucji fazy i tworzenia stopu cząsteczek nanoproszków tytanu i aluminium. Badanie wykorzystuje metodę topienia lewitacyjnego w przepływie (F-L) do syntezowania nanoproszków tytanu i aluminium o średnicy mniejszej niż 100 nm. Autorzy analizują wpływ temperatury parowania na skład fazowy nanoproszków, obserwując zmiany w proporcjach faz $c-TiAl$ i $a2-Ti_3Al$ w zależności od temperatury. Eksperymenty wykazały również, że obniżenie temperatury parowania prowadzi do pojawienia się skomplikowanych faz, takich jak $e(h, l)-TiAl_3$, TiO_2 oraz Al_2O_3 . Badanie to dostarcza istotnych informacji na temat kontroli składu fazowego i właściwości nanoproszków tytanu i aluminium, co ma znaczenie dla przyszłych zastosowań w metalurgii proszków.

2.6 Badania termo-chemiczne

Wiele badań zostało przeprowadzonych z wykorzystaniem ETL w celu zbadania termodynamicznych i kinetycznych aspektów interakcji gaz-metal związanych z opera-

cjami pirometalurgicznymi w podwyższonych temperaturach. Na przykład, w procesach produkcji żelaza i stali, stopiona stal nieuchronnie wchodzi w bezpośredni kontakt z powietrzem. Daje to możliwość reakcji utleniania, absorpcji azotu i pobierania wodoru z wilgoci w atmosferze, zwłaszcza gdy wilgotność jest wysoka. Wszystkie te oddziaływania mają negatywny wpływ na jakość stali [73].

Przeprowadzono szereg projektów związanych z reakcjami gaz-metal, w których stopione krople stali były lewitowane, i wystawione na działanie atmosfer o kontrolowanym potencjale tlenu w celu określenia parametrów interakcji [32]

Podczas eksperymentów ETL obejmujących chemię metalurgiczną, na równowagę gaz-ciecz oraz kinetykę wpływa wymiana ciepła i masy między kroplą a atmosferą. W odniesieniu do wymiany ciepła należy zauważyć, że wzbudnik stale dostarcza energię elektryczną do ogrzewania kropli. Aby utrzymać zmienną w czasie temperaturę, dostarczany jest gaz chłodzący. Po osiągnięciu przez kroplę wymaganej temperatury, na granicy gaz-metal powstaje stromy gradient temperatury, który może powodować znaczny strumień dyfuzji termicznej w mieszaninie gazów. Publikacja autorstwa J Little i innych [119] omawia problem reoksydacji stali w stanie ciekłym podczas jej ekspozycji na powietrze w procesie ciągłego odlewania. Badanie to koncentrowało się na analizie wyglądu strumienia ze zbiornika odlewniczego oraz na typach produktów reoksydacji, które tworzą się w warunkach nieosłoniętych. Praca ta miała znaczący wpływ na zrozumienie efektów zanieczyszczenia atmosferycznego na jakość stale ciągle odlewanych, w szczególności jak reoksydacja i absorpcja powietrza w procesie odlewania mogą prowadzić do tworzenia makrowtrąceń, wpływając na jakość stali

Artykuł autorstwa D. J. Zuliani i A. McLean [154], prezentuje badania nad zachowaniem unoszonych lewitacyjnie kropli żelaza zawierających do 2% manganu, poddanych działaniu atmosfer o kontrolowanym potencjale siarki w temperaturze 1550°C. Wyniki eksperymentów wykazały, że obecność reakcji chemicznych w gazowej fazie granicznej lub kondensacja pary metalu nie zwiększały znacząco tempa parowania manganu. Stwierdzono także, że tempo absorpcji siarki przez krople żelaza jest spowalniane zarówno przez dyfuzję cieplną, jak i reakcję chemiczną między H_2S a parą manganu w gazowej fazie granicznej. Wyniki te mają znaczenie dla zrozumienia procesów zachodzących w produkcji stali wysokomanganowej, szczególnie w kontekście ograniczania reoksydacji podczas wlewu.

Badanie przygotowane przez P. Wu z zespołem [138] skupia się na wpływie dyfuzji cieplnej na kinetykę dekarbonizacji. Przedstawiają analizę teoretyczną i eksperymen-

talną, badając, jak dyfuzja cieplna wpływa na szybkość usuwania węgla z unoszących się kropelek stopu $Fe - C$. Badanie to dostarcza ważnych wniosków dotyczących mechanizmów dekarbonizacji w kontekście przetwarzania stali. W drugim artykule [140] ten sam zespół badaczy, koncentruje się na interakcjach chromu i siarki w kontekście procesu dekarbonizacji kropelek stopu $Fe - C$, unoszących się w lewitacji elektromagnetycznej. Autorzy badają wpływ tych interakcji na proces dekarbonizacji, dokonując eksperymentalnej analizy przy użyciu mieszanki gazowej $CO_2 - Ar$. Kluczowe wyniki obejmują zrozumienie roli chromu w stabilizowaniu siarki w kroplach stopu, co wpływa na dynamikę i efektywność procesu dekarbonizacji. Trzecia praca [139], również autorstwa P. Wu, i innych, bada termodynamiczne i kinetyczne aspekty odparowywania siarki z kropelek stopu $Fe - C$. Praca ta koncentruje się na zrozumieniu mechanizmów i warunków, pod którymi siarka odparowuje z unoszących się kropelek, dostarczając istotnych informacji dla procesów przemysłowych związanych z oczyszczaniem stali. Badanie to łączy analizy termodynamiczne z eksperymentami, by uzyskać dogłębne zrozumienie procesów zachodzących w elektromagnetycznym topieniu lewitacyjnym.

W swoich badaniach J. Siwka i A. Hutny zajmują się równowagą chemiczną i aktywnością azotu w ciekłych metalach oraz stopach żelaza. W pierwszej pracy [109], Siwka skupia się na stałych równowagi i aktywności azotu w ciekłych metalach i stopach żelaza. Autor analizuje zależności między aktywnością azotu a składem chemicznym, temperaturą oraz ciśnieniem. Stosuje metodologie termodynamiczne do wyznaczania stałych równowagi, co ma istotne znaczenie dla zrozumienia procesów metalurgicznych i optymalizacji procesów produkcyjnych. W drugim artykule [110], Siwka wspólnie z A. Hutnym proponuje uniwersalną formułę do obliczania rozpuszczalności azotu w ciekłych stalach stopowych z azotem. Formuła ta opiera się na szerokim zakresie danych eksperymentalnych i teoretycznych, umożliwiając dokładne przewidywanie rozpuszczalności azotu w różnych warunkach. Praca ta ma kluczowe znaczenie dla projektowania nowych stopów oraz optymalizacji procesów metalurgicznych, gdzie kontrola zawartości azotu jest istotna. Obie prace wniosły znaczący wkład w zrozumienie zachowań azotu w ciekłych metalach, co jest kluczowe dla rozwoju nowoczesnych technologii metalurgicznych.

Wyniki przedstawione przez M. Beaudhuina i współpracowników [11], przedstawiają wpływ czystości krzemu na zjawisko przechłodzenia w kontekście elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego. Badanie koncentruje się na roli zanieczyszczeń w procesie krzepnięcia krzemu, z uwzględnieniem wpływu azotu i węglowodorów. Autorzy prezentują nowe urządzenie do elektromagnetycznej lewitacji, które pozwala na kontrolę stężenia

zanieczyszczeń poprzez regulację ciśnienia cząstkowego azotu lub gazu węglowodorowego. W pracy omówiono również statystyczne pomiary przechłodzenia, uwzględniając zmiany koncentracji zanieczyszczeń.

2.7 Modelowanie Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego dla stałego wsadu

Potrzeba przygotowania modeli obliczeniowych jest powszechna wśród badaczy, ale nie ma uniwersalnego modelu, który byłby przydatny we wszystkich sytuacjach i odpowiadał na wszystkie potrzeby badaczy. Model, przedstawiony w rozdziale 5.3 uzupełnia podejścia prezentowane przez innych badaczy [57, 98, 103, 137], uwzględniając zmiany właściwości materiału podczas jego podgrzewania, dynamikę płynów w powietrzu otaczającym wsad oraz asymetrię modelu wzbudnika.

J. P. Witteveen i inni [137] zaproponowali asymetryczny model 3D do symulacji działania wzbudnika (rysunek: 2.1), w tym wpływu asymetrii na pole magnetyczne i siłę wznoszącą. Zostało to zweryfikowane przez porównanie z modelem opublikowanym przez innego autora. Jednak w porównaniu z naszym modelem brakuje możliwości śledzenia zmian temperatury wsadu w czasie, przy jednoczesnym uwzględnieniu zmian właściwości materiału. Ponadto nie uwzględniono otoczenia wsadu (tj. zawsze zakłada się, że proces odbywa się w próżni).

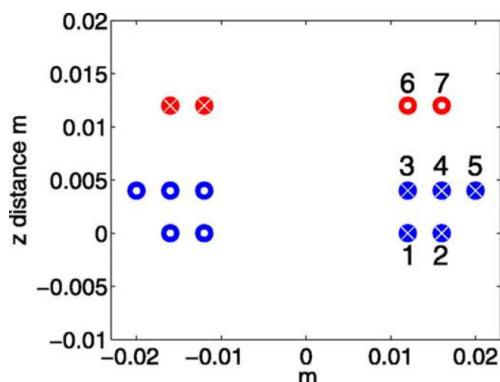


Rysunek 2.1: Geometria modelu zaproponowanego przez Witteveen i innych.

Źródło: [137]

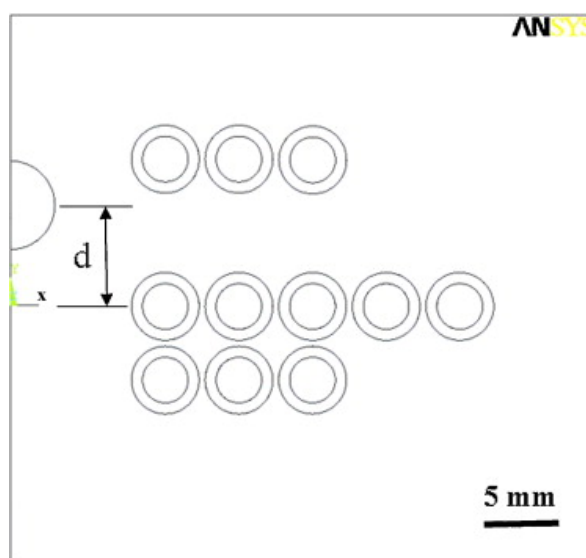
Z. L. Royer i inni [98] przygotowali model 2D (rysunek: 2.2), ale brak asymetrii sprawia, że model ten jest uproszczoną reprezentacją rzeczywistości. Zaletą tego podejścia jest to, że położenie wsadu podczas procesu można oszacować analitycznie. Ponadto model nie uwzględnia zmian właściwości materiału dla różnych temperatur

i przepływu powietrza wokół niego. Utrata ciepła następuje poprzez promieniowanie i konwekcję modelowaną z wykorzystaniem współczynnika konwekcji.



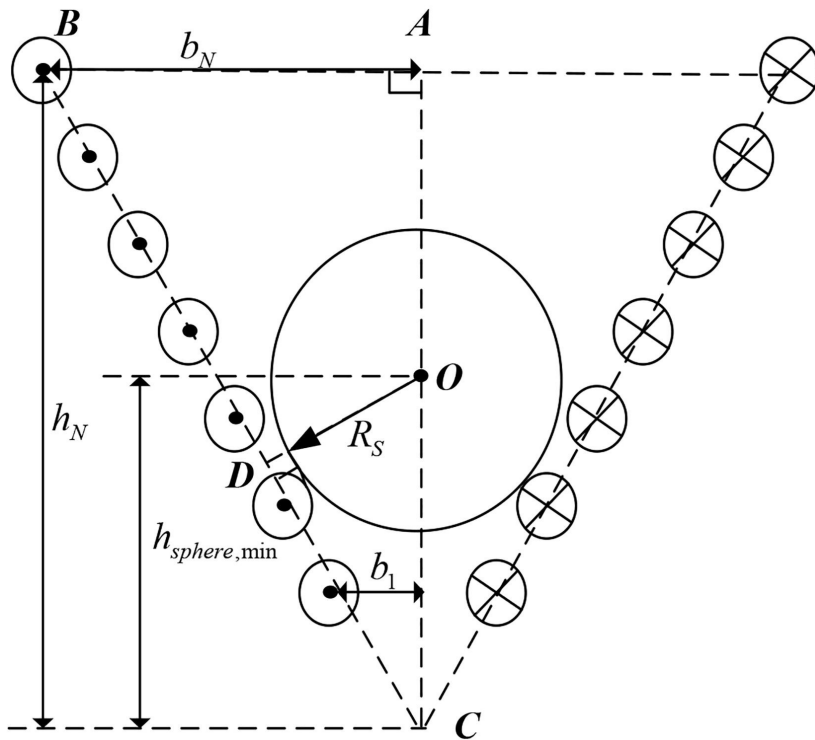
Rysunek 2.2: Geometria modelu zaproponowanego przez Royera i innych. Źródło: [98]

Ponadto A. Kermanpur i inni [57] wprowadzili symetryczny model 2D (rysunek: 2.3). Obliczenia przeprowadzono na dwa sposoby, pierwszym były obliczenia cykliczne a drugim obliczenia dwuetapowe. Podczas badań najpierw przeprowadzono analizę harmoniczną, a następnie analizę termiczną. W kolejnych iteracjach uwzględniono zmiany właściwości materiału wynikające ze zmian temperatury. W artykule nie podano informacji na temat przepływu powietrza w modelu, więc najprawdopodobniej nie jest on obecny. Model został zweryfikowany eksperymentalnie.



Rysunek 2.3: Geometria modelu zaproponowanego przez Kermanpura i innych. Źródło: [57]

I. Sassonker i A. Kuperman [103] zaproponowali model elektromechaniczny, który zawiera część elektryczną składającą się z szeregowego obwodu rezonansowego i typpowego podsystemu mechanicznego drugiego rzędu. Sam model jest dwuwymiarowy i cylindryczny (rysunek: 2.4). Brakuje w nim jednak sprzężenia zwrotnego między temperaturą a właściwościami materiału, a przepływ gazu otaczającego wsad nie jest brany pod uwagę. W artykule przedstawiono walidację eksperymentalną.



Rysunek 2.4: Geometria modelu zaproponowanego przez Sassonkera i Kupermana.

Źródło: [103]

W literaturze można znaleźć inne modele symulacyjne ELT, które trudno porównać z prezentowanymi modelami ze względu na ich różne przeznaczenia. Pierwszy podtyp takich modeli obejmuje przepływ konwekcyjny wewnątrz stopionego wsadu [21, 52, 66]. Drugi dotyczy pól temperatury i przemian fazowych [39, 124, 125].

Tabela 2.1: Podsumowanie wybranych właściwości modeli symulacyjnych znalezionych w literaturze.

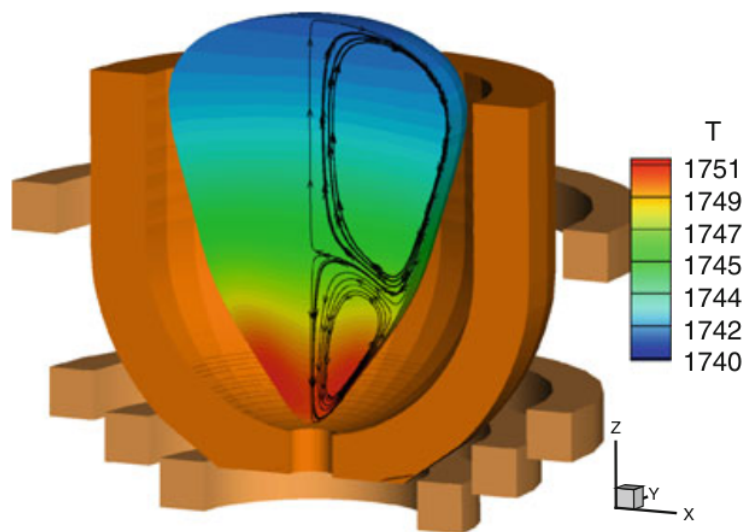
Autor	Model jest asymetryczny	Sposób weryfikacji	Wymiana ciepła z otoczeniem	Właściwości materiałowe zmieniają się razem z temperaturą
Witteveen et al. (2021)	Tak	Innym modelem	Brak	Nie
Royer et al. (2013)	Nie	Nie zweryfikowano	Konwekcja i radiacja	Nie
Kermanpur et al. (2011)	Nie	Poprzez eksperyment	Brak	Tak
Sassonker and Kuperman (2020)	Nie	Poprzez eksperyment	Brak	Nie

2.8 Modelowanie Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego dla stopionego wsadu

Inną rodziną modeli są te, które zajmują się symulacją zachowania wsadu po osiągnięciu temperatury topienia. W tej sekcji przedstawiono najważniejsze badania, które przeprowadzono w tym celu.

Praca napisana przez V. Bojarevics i R. W. Hyers [14] bada zachowanie cieczy w warunkach zmniejszonej grawitacji oraz w polach magnetycznych kompensujących grawitację. Badania przeprowadzono, aby zrozumieć dynamikę cieczy w warunkach, które naśladują mikrogravitację, co ma istotne znaczenie dla przyszłych misji kosmicznych i technologii przetwarzania materiałów. Wykorzystano techniki lewitacji elektromagnetycznej, aby unosić i kontrolować próbki cieczy bez kontaktu z powierzchniami, eliminując zanieczyszczenia i wpływy mechaniczne. Kluczowe wyniki obejmują obserwacje ruchu i deformacji cieczy pod wpływem różnych konfiguracji pól magnetycznych, co dostarcza nowych informacji na temat zarządzania płynami w warunkach mikrogravitacji oraz możliwości wykorzystania lewitacji magnetycznej w procesach przemysłowych na Ziemi. W omawianej pracy wykorzystano zaawansowany model symulacyjny,

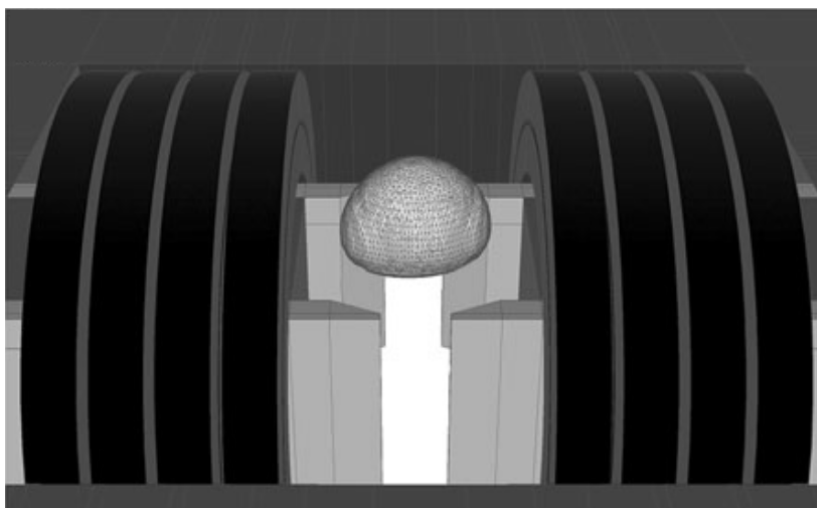
aby przewidzieć zachowanie cieczi w warunkach zmniejszonej grawitacji oraz w polach magnetycznych kompensujących grawitację. Model ten bazuje na równaniach hydrodynamicznych opisujących przepływ i deformację cieczi, uwzględniając jednocześnie siły elektromagnetyczne i grawitacyjne. Symulacje komputerowe przeprowadzono z użyciem metod numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych (FEM), aby precyzyjnie obliczyć rozkład pola magnetycznego i jego wpływ na lewitującą ciecź. Model uwzględniał również wpływ parametrów takich jak lepkość cieczi, przewodnictwo magnetyczne, oraz konfiguracje pola magnetycznego. Geometrie opisanego modelu można zobaczyć na rysunku 2.5.



Rysunek 2.5: Geometria modelu symulującego wsad po stopieniu przedstawionego przez Bojarevics i Hyers. Źródło: [14]

Artykuł napisany przez S. Spitans i innych [116] skupia się na opracowaniu i weryfikacji modelu numerycznego do analizy dynamiki swobodnej powierzchni stopu w zmiennym polu elektromagnetycznym. Model został przedstawiony na rysunku 2.6. Model numeryczny zastosowany w artykule opiera się na sprzężeniu trzech głównych komponentów: pola elektromagnetycznego, przepływu cieczi i dynamiki powierzchni swobodnej. Do rozwiązania równań Maxwella dla pola elektromagnetycznego zastosowano metodę elementów skończonych (FEM). Przepływ cieczi opisano równaniami Naviera-Stokesa, które rozwiązano za pomocą metody objętości skończonych (FVM). Model uwzględnia także zmienność właściwości fizycznych stopu, takich jak lepkość i przewodnictwo elektryczne, w funkcji temperatury. Do modelowania powierzchni swobodnej wykorzystano metodę VOF (Volume of Fluid), która śledzi położenie i kształt powierzchni

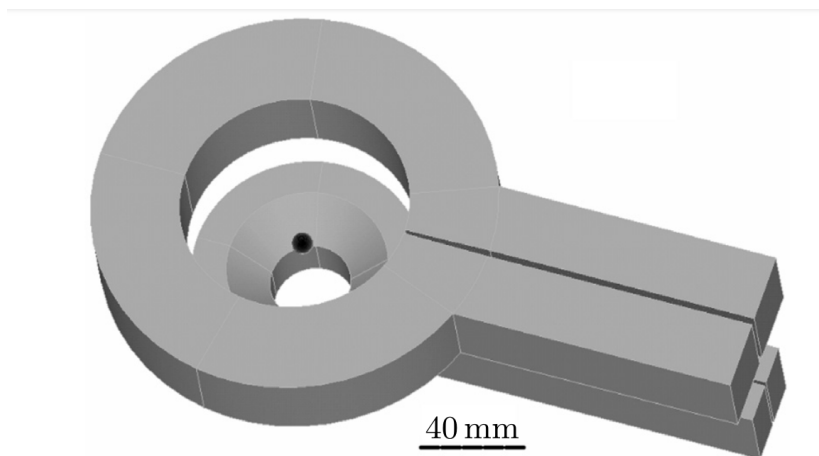
między fazami. Cały model jest zintegrowany w jedną platformę obliczeniową, umożliwiającą symulację interakcji między polem elektromagnetycznym, dynamiką cieczy i deformacją powierzchni stopu w czasie rzeczywistym. Eksperymentalna weryfikacja modelu wykazała jego zdolność do dokładnego odwzorowania dynamiki powierzchni swobodnej w zmiennym polu elektromagnetycznym, co jest kluczowe dla zrozumienia procesów zachodzących podczas elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego.



Rysunek 2.6: Geometria modelu symulującego wsad po stopieniu przedstawionego przez Spitans i innych. Źródło: [116]

S. Spitans z zespołem w swojej pracy [117], opisuje modelowanie numeryczne dynamiki swobodnej powierzchni ciekłego metalu pod wpływem zmiennego pola elektromagnetycznego. Model jest przedstawiony na rysunku 2.7. Autorzy zastosowali zaawansowane techniki symulacyjne, aby zbadać, jak pole elektromagnetyczne wpływa na ruch i kształt powierzchni topionego metalu. Wyniki badań wykazały, że zmienne pole elektromagnetyczne może znacząco wpływać na stabilność i dynamikę powierzchni, prowadząc do powstawania złożonych wzorców przepływu i falowania. Artykuł podkreśla znaczenie dokładnego modelowania w przewidywaniu zachowań procesów przemysłowych związanych z topieniem metali, co może prowadzić do optymalizacji tych procesów i poprawy jakości produktów końcowych. Autorzy zastosowali model numeryczny oparty na metodzie objętości skończonych (FVM) do symulacji dynamiki swobodnej powierzchni topionego metalu. Model ten uwzględnia równania Naviera-Stokesa dla lepkiego, nieściśliwego płynu, połączone z równaniami Maxwella opisującymi pole elektromagnetyczne. Do rozwiązania tych równań zastosowano algorytm SOLA-VOF (Solution Algorithm - Volume of Fluid), który umożliwia śledzenie i modelowanie swo-

bodnej powierzchni cieczy. Model uwzględnia również efekty napięcia powierzchniowego oraz indukowanej przez zmienne pole elektromagnetyczne siły Lorentza, które wpływają na ruch i deformację powierzchni. Autorzy zweryfikowali swój model poprzez porównanie wyników symulacji z dostępnymi danymi eksperymentalnymi, co potwierdziło jego dokładność i przydatność w analizie dynamiki powierzchni topionych metali pod wpływem zmiennego pola elektromagnetycznego.



Rysunek 2.7: Geometria modelu symulującego wsad po stopieniu przedstawionego przez Spitans i innych. Źródło: [117]

2.9 Badania wpływu zmiany kształtu wzbudnika na parametry procesu

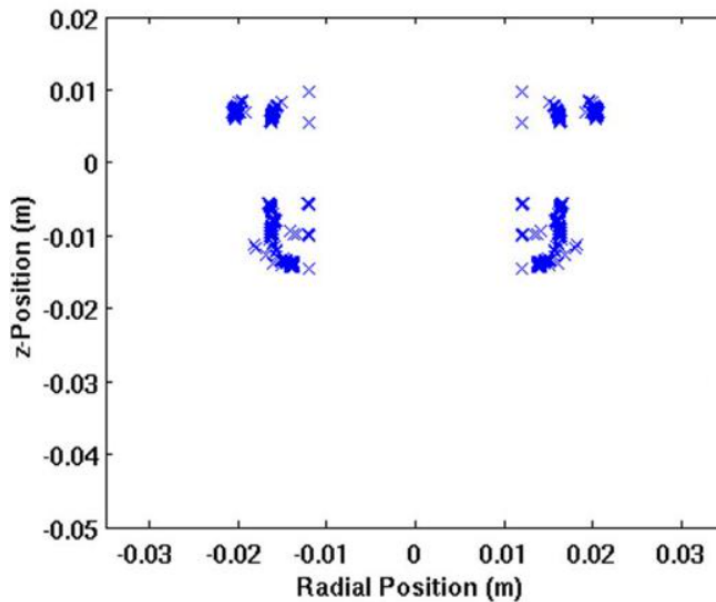
Na podstawie przygotowanych modeli obliczeniowych badacze dokonywali dalszych prac. Jednym z kierunków, który został obrany, była optymalizacja kształtu wzbudnika. W tej sekcji przedstawiono najważniejsze badania z tej kategorii.

Artykuł napisany przez Z. R. Royera i innych [99], przedstawia zastosowanie algorytmu inspirowanego genetycznym do optymalizacji wzbudników używanych w procesie elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego. Celem badania było zminimalizowanie zużycia energii przy jednoczesnym zapewnieniu stabilnej lewitacji i efektywnego topienia próbki. Autorzy zastosowali podejście iteracyjne, gdzie poszczególne parametry wzbudnika były dostosowywane na podstawie wyników poprzednich iteracji. W użytym modelu obliczeniowym nie uwzględniono zmian właściwości materiału wraz z temperaturą, a kształt wsadu jest kulisty i nie ulega deformacją. Wyniki pokazały, że zopty-

malizowane wzbudnik znacznie poprawił efektywność energetyczną i stabilność procesu w porównaniu do tradycyjnych metod projektowania. Artykuł podkreśla potencjał algorytmów ewolucyjnych w inżynierii elektromagnetycznej, sugerując dalsze badania w tym kierunku. Przedstawiony artykuł szczegółowo opisuje proces optymalizacji wzbudnika, wykorzystując algorytm podobny do genetycznego. Proces ten przebiega w kilku kluczowych etapach:

- Na początku określono początkowy zestaw parametrów wzbudnika, takich jak ich liczba zwojów, średnica, odległość między zwojami oraz prąd przepływający przez wzbudnik. Parametry te stanowiły chromosomy w kontekście algorytmu genetycznego.
- Każdy zestaw parametrów (osobnik) został oceniony pod kątem swojej efektywności w kontekście dwóch głównych kryteriów: stabilności lewitacji próbki oraz zużycia energii. Funkcja przystosowania była zdefiniowana tak, aby równoważyć te dwa aspekty, faworyzując konfiguracje zapewniające stabilną lewitację przy niskim zużyciu energii.
- Zestawy parametrów z najwyższymi wartościami funkcji przystosowania były wybierane do dalszego przetwarzania, podobnie jak w naturalnej selekcji. Zestawy te miały większą szansę na przejście do następnej generacji.
- Zestawy parametrów z najwyższymi wartościami funkcji przystosowania były wybierane do dalszego przetwarzania, podobnie jak w naturalnej selekcji. Zestawy te miały większą szansę na przejście do następnej generacji.
- Wybrane zestawy parametrów były łączone ze sobą, tworząc nowe zestawy, które dziedziczyły cechy obu "rodziców". Proces ten polegał na losowym wymianianiu segmentów parametrów między zestawami.
- Aby wprowadzić różnorodność i uniknąć lokalnych minimów, niewielka liczba parametrów w nowych zestawach była losowo modyfikowana. Mutacje te miały na celu eksplorację nowych obszarów przestrzeni parametrów.
- Proces selekcji, krzyżowania i mutacji był powtarzany przez wiele generacji, za każdym razem oceniając nowe zestawy parametrów i wybierając najlepsze z nich do dalszego przetwarzania.

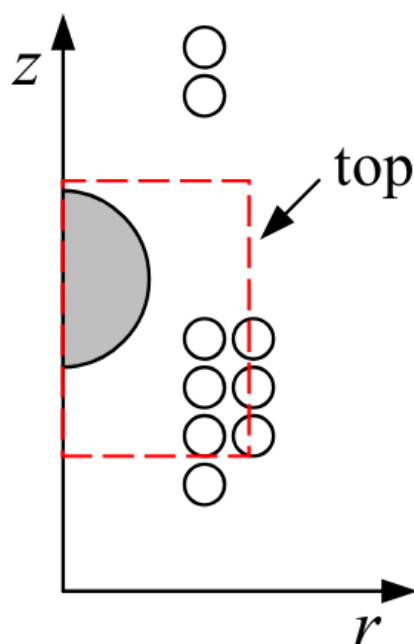
Kryterium wyboru poszczególnych zestawów odbywały się na podstawie: zdolności do lewitacji wsadu i możliwości osiągnięcia temperatury topienia dla prądu w zakresie od 100 do 400 A. W wyniku tego procesu optymalizacyjnego autorzy uzyskali zestawy parametrów wzbudnika, które znacznie poprawiły wydajność energetyczną oraz stabilność lewitacji w porównaniu do pierwotnych konfiguracji. Zoptymalizowany wzbudnik był bardziej efektywny, co przełożyło się na mniejsze zużycie energii i lepsze parametry operacyjne całego systemu elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego. Najbardziej obiecujące pozycje zwojów zostały przedstawione na rysunku: 2.8. Ze względu na inne kryteria oceny rozwiązania, w tym niepodanie efektywności procesu, nie da się ich bezpośrednio zestawić z wzbudnikami rozważanymi w tej pracy.



Rysunek 2.8: Najbardziej obiecujące położenia zwojów wzbudnika wybrane przez Royera i innych. Źródło: [99]

Publikacja autorstwa X. Cai z zespołem [22] opisuje zaawansowane techniki optymalizacji pól elektromagnetycznych w celu lewitacji dużych mas metalicznych. Badacze opracowali model numeryczny do analizy i projektowania konfiguracji wzbudników elektromagnetycznych, który maksymalizuje siłę wznoszącą działającą na wsad. W modelu nie uwzględniono zmian właściwości materiału wraz z temperaturą, a kształt wsadu jest kulisty i nie ulega deformacji. Wyniki eksperymentalne potwierdzają, że zoptymalizowane pola elektromagnetyczne pozwalają na stabilną lewitację materiałów o większej masie przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii. Implikacje tego badania obejmują

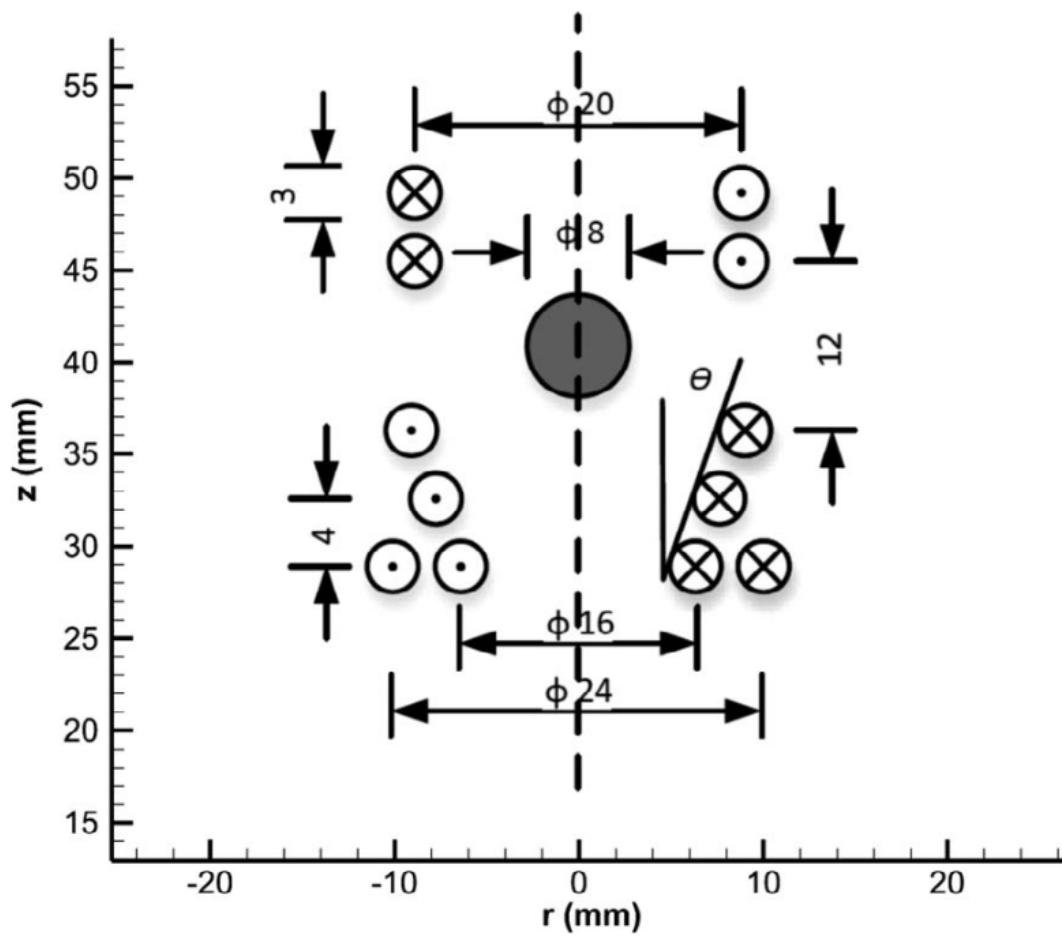
mują poprawę procesów przemysłowych związanych z topieniem i przetwarzaniem metali, w tym wytwarzanie wysokiej jakości stopów oraz badania właściwości fizycznych metali w stanie ciekłym bez kontaktu z pojemnikiem. Optymalizacja pola elektromagnetycznego w artykule obejmuje dwa główne aspekty: konfigurację wzbudnika oraz jego geometryczne rozmieszczenie. Optymalizacja konfiguracji polega na ustaleniu optymalnej liczby zwojów w uzwojeniu lewitacyjnym, gdzie eksperymentalnie stwierdzono, że 7 zwojów zapewnia najlepszą równowagę między liczbą zwojów a efektywnością przyrostu siły lewitacyjnej. Drugi aspekt dotyczy optymalizacji kształtu i rozmieszczenia wzbudnika. Badania wykazały, że konfiguracja wzbudnika w kształcie stożka, z kątem półstożka około 40 stopni, zapewnia lepszą stabilność lewitacji i wyższą siłę wznoszącą w porównaniu do tradycyjnych wzbudników cylindrycznych. Ponadto, użycie wzbudników dwuwarstwowych, w których liczba zwojów wewnętrznej i zewnętrznej warstwy jest zbliżona, maksymalizuje siłę lewitacyjną. Ostateczne optymalizacje wykazały, że struktury wzbudnika w konfiguracji 4+3 lub 3+4 (wewnętrzna + zewnętrzna warstwa, zobacz rysunek 2.9) jest najefektywniejsza, przy czym dalsze zwiększanie liczby zwojów nie przynosi znaczącej poprawy. W pracy nie podano efektywności procesu.



Rysunek 2.9: Wizualizacja dwuwarstwowego ułożenia zwojów wzbudnika, zaproponowana przez Cai i innych. Źródło: [22]

Badania prowadzone przez L. Feng ze swoją grupą [40] analizują wpływ kąta ułożenia zwojów we wzбудniku na deformację i stabilność kropli ciekłego metalu w systemie lewitacji elektromagnetycznej. Badania wykorzystają zarówno symulacje numeryczne, jak i eksperymenty, aby ocenić, jak różne kąty zwojów wzbudnika (kąt jest oznaczony jako θ na rysunku 2.10) wpływają na kształt i stabilność lewitującej kropli. Model nie bierze pod uwagę zmian we właściwościach materiałów wraz ze zmianą temperatury. Wyniki pokazują, że odpowiedni dobór parametrów geometrycznych wzbudnika może znacznie poprawić stabilność kropli, zmniejszając jej deformację i wibracje. Autorzy w wynikach nie podają sprawności procesu. Odkrycia te mają istotne znaczenie dla optymalizacji procesów przetwarzania materiałów w warunkach bezkontaktowych, gdzie precyzyjna kontrola nad kształtem i stabilnością kropli jest kluczowa. Artykuł przeprowadza symulację numeryczną przejściowego stanu kropli ciekłego metalu lewitującej w systemie elektromagnetycznym, wykorzystując metodę Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE). Symulacja obejmuje sprzężenie pól magnetycznych, przepływu, temperatury oraz deformacji wolnej powierzchni kropli. Główne wnioski są następujące:

- Kropla ciekłego metalu oscyluje pionowo i deformuje się na początku symulacji, ale deformacja jest mała ze względu na niską gęstość aluminium. Większa deformacja wystąpiłaby przy materiałach o wyższej gęstości.
- Wraz ze wzrostem kąta nawinięcia zwojów, pozycja lewitacji kropli obniża się, zbliżając się do wzbudnika i oddalając od zwojów stabilizujących. Maksymalna deformacja kropli występuje przy kącie 12 stopni, sugerując unikanie takiego ustawienia wzbudnika dla lepszej stabilności lewitacji.
- Przy większych kątach nawinięcia zwojów wzbudnika, maksymalna prędkość oscylacji i temperatura wsadu maleją, co poprawia stabilność lewitacji i potencjalnie umożliwia lepszą kontrolę procesu przechładzania.



Rysunek 2.10: Geometria wzbudnika rozważana przez Feng ze swoją grupą.
Źródło: [40]

Rozdział 3

Cel, teza i zakres pracy

3.1 Cel i teza

Celem pracy jest opracowanie metodyki optymalizacji i jej walidacja dla wybranego modelu wzbudnika do Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego (ETL) metali.

Podstawowym kryterium oceny wyników pracy jest sprawności topienia, która jest maksymalizowana, co powinno skutkować zmniejszeniem kosztu realizacji procesu w stosunku do uzyskanych efektów. Przez sprawność będzie rozumiany stosunek mocy indukowanej we wsadzie do całkowitej mocy w układzie (3.1). Jednocześnie konieczne jest spełnienie warunku lewitacji wsadu w stabilnym punkcie równowagi.

$$\eta_{EL} = \frac{P_B}{P_T} \quad (3.1)$$

Gdzie:

- P_B - moc czynna wydzielona we wsadzie,
- P_T - suma mocy czynnej wydzielonej we wsadzie i we wzbudniku.

Na tej podstawie sformułowano tezę pracy: istnieje metodyka optymalizacji, która dla wybranej metody optymalizacji daje rozwiązanie optymalne lub zbliżone do niej. Dodatkowo istnieje metoda walidacji modelu symulacyjnego, która może potwierdzić jego wiarygodność.

Optymalne parametry topienia zależą od wielu czynników. Do podstawowych należą

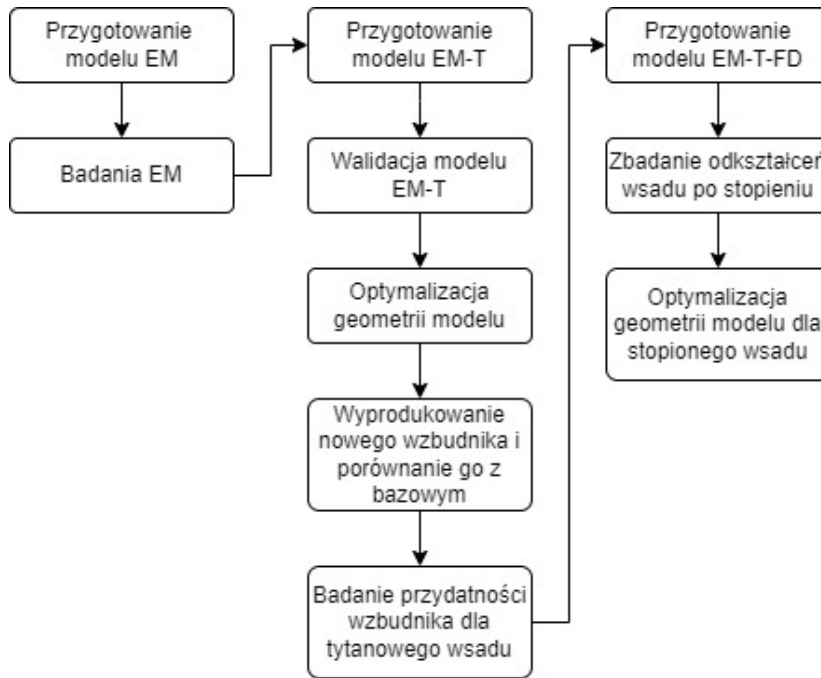
właściwości wzbudnika i wsadu. Modelowanie procesu ETL wymaga sprzężonej analizy pola elektromagnetycznego, dynamiki płynów i pola temperatury. Taki model obliczeniowy sam w sobie stanowi wyzwanie badawcze, dodatkowo czasy obliczeń są długie. W ramach pracy konieczne będzie więc przyjęcie uproszczeń w modelu obliczeniowych i bardzo rozsądny wybór metod optymalizacyjnych.

3.2 Zakres pracy

W ramach pracy planowane jest:

- opracowanie modelu obliczeniowego pola elektromagnetycznego dla ETL,
- przeprowadzenie wstępnych obliczeń wzbudnika do ETL,
- opracowanie modelu obliczeniowego pola elektromagnetycznego sprzężonego z polem temperatury dla ETL, na podstawie wzbudnika dostępnego dla badaczy,
- walidacja poprawności obliczeń dla modelu EM-T na podstawie zestawienia obliczonych wielkości z pomiarami w ramach eksperymentu, przy wykorzystaniu aluminiowego wsadu,
- optymalizacja geometrii zweryfikowanego modelu,
- zakup wzbudnika o geometrii będącej wynikiem procesu optymalizacji i porównanie ich właściwości między sobą,
- weryfikacja, jak sprawuje się zoptymalizowany wzbudnik dla tytanowego wsadu,
- przygotowanie modelu obliczeniowego pola elektromagnetycznego sprzężonego z polem temperatury i dynamiką płynów dla scenariusza, w którym interesuje nas utrzymanie wsadu w stanie ciekłym,
- eksperymentalne zbadanie odkształcenia wsadu po stopieniu i porównanie go do wyników symulacji,
- optymalizacja kształtu wzbudnika pod kątem sprawności procesu dla wariantu, w którym badaczom zależy na utrzymaniu wsadu w stanie stopionym.

Graficzną reprezentację zakresu pracy można zobaczyć na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1: Zakres pracy zawartej w pracy doktorskiej.

3.3 Układ pracy

W rozdziale Wstęp teoretyczny przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z Elektromagnetycznym Topieniem Lewitacyjnym (ETL). Należą do nich: analiza pola elektromagnetycznego, model termiczny, siła wznosząca i rozważania na temat dynamiki płynów. Drugim aspektem są praktyczne zastosowania rozważanej techniki topienia metali, które obejmują zarówno obszary produkcyjne, jak i badawcze. Dodatkowo został dokonany przegląd metod optymalizacyjnych, z których najbardziej adekwatne zostały wykorzystane w późniejszych rozdziałach.

Rozdział Modele obliczeniowe przedstawia modele obliczeniowe dla trzech rozważanych podejść. Dla modelu EM analizę ograniczono do analizy pola elektromagnetycznego modelowanego trójwymiarowo. W przypadku modelu EM-T proponowany model obejmuje analizę pola elektromagnetycznego oraz pola temperatury wraz z konwekcyjnym i radiacyjnym oddawaniem ciepła. Konwekcyjna wymiana ciepła została zamodelowana z wykorzystaniem dynamiki płynów, a właściwości materiałów były aktualizowane wraz ze zmieniającą się temperaturą. Z kolei dla modelu EM-T-FD zapro-

ponowano model wzbudnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego, który symuluje zachowanie wsadu po osiągnięciu temperatury topienia. Początkową geometrią wsadu jest kula, co jest zgodne z założeniami przyjętymi w poprzednich rozdziałach. Wynikiem działania modelu jest nowa geometria wsadu, która odzwierciedla jego kształt zaobserwowany podczas eksperymentów.

W rozdziale Stanowisko pomiarowe i metodyka pomiarów przedstawiono zestawienie narzędzi, które zostały wykorzystane do wykonania pomiarów na wzbudniku do ETL. Kontrolowane charakterystyki oprócz parametrów prądowych wzbudnika obejmują położenie wsadu i czas, w którym wsad osiąga temperaturę topienia. Znajduje się tutaj również opis metodyki przeprowadzenia procesu topienia i akwizycji danych pomiarowych.

Następnie w rozdziale Wstępne badania EM przedstawiono wyniki obliczeń wielowariantowych dla modelu przedstawionego w rozdziale Model EM. Badania mają na celu zbadanie zależności pomiędzy podstawowymi parametrami elektrycznymi i geometrycznymi a elektrodynamiczną siłą wyporu i mocą indukowaną we wsadzie. W ramach pracy wskazano również wariant o najwyższej sprawności. Spośród 245 rozpatrywanych w pracy wariantów przeprowadzono szczegółową analizę obejmującą stabilność lewitacji i czasu topienia dla najbardziej obiecującego scenariusza.

W rozdziale Badania EM-T praca jest przedstawiona w trzech sekcjach:

- Pierwsza sekcja przedstawia eksperymentalną walidację modelu, który jest opisany w rozdziale Model EM-T. Eksperymentalna walidacja modelu została przeprowadzona przy użyciu stopu aluminium, ze względu na łatwość pomiarów. Pomiarów obejmowały parametry elektryczne, pozycje stopionego wsadu podczas lewitacji, czas topienia i rozkład temperatury w jego obszarze. Weryfikacja wykazała zadowalającą zgodność między modelem obliczeniowym a symulacją położenia wsadu. Badania potwierdziły dobrą reprezentatywność opracowanego modelu numerycznego, co czyni go użytecznym narzędziem do przyszłej optymalizacji lewitacyjnego systemu topienia.
- Druga sekcja dotyczy optymalizacji wzbudnika do lewitacyjnego topienia metali. W ramach tej części pracy wykorzystano model przygotowany dla istniejącego wzbudnika. Pierwszym etapem pracy jest eksploracja przestrzeni rozwiązań i wybór odpowiedniego algorytmu optymalizacji. Optymalizacja opiera się na modelu symulacyjnym i estymowanej funkcji celu, która jest aktualizowana na podstawie

wyników uzyskanych w kolejnych iteracjach. Efektem optymalizacji jest uzyskanie sub-optymalnej geometrii wzbudnika.

- Z kolei w trzeciej sekcji tego rozdziału zbadano eksperymentalnie wpływ zmiany parametrów geometrycznych wzbudników na parametry elektryczne układu, czas topienia wsadu oraz siłę wznoszenia wsadu. Pomiar przeprowadzono w odniesieniu do dwóch wzbudników dla ETL, z których pierwszy stanowił podstawę, a drugi był wynikiem optymalizacji mającej na celu znalezienie najlepszych parametrów geometrycznych dla prezentowanej klasy wzbudników. Wynikiem badań było potwierdzenie wyższej sprawności procesu dla zoptymalizowanego wzbudnika i zachęta do stosowania go.

W rozdziale Badania EM-T-FD przedstawiono wyniki symulacji geometrii wsadu po osiągnięciu temperatury topienia. Następnie na tej podstawie przeprowadzono proces optymalizacji wzbudnika przy założeniu rzeczywistej, zmieniającej się podczas topienia, geometrii wsadu. Parametry optymalizacji są takie same jak te przedstawione dla obliczeń EM-T. Funkcja celu, zmienne i ograniczenia. Funkcja celu obejmuje sprawność procesu. Problem jest rozwiązywany dwuetapowo, najpierw jest próbkowana przestrzeń rozwiązań, w której spodziewano się znaleźć optimum, następnie na tej podstawie dokonano procesu optymalizacji.

Rozdział 4

Wstęp teoretyczny

4.1 Opis pola elektromagnetycznego

4.1.1 Model pola elektromagnetycznego

W tym rozdziale przedstawiono model pola elektromagnetycznego wykorzystywany do obliczeń w przestrzeni trójwymiarowej. Analizę przeprowadzono dla pola harmonicznego, a główne wyniki przedstawiono jako gęstość objętościową sił elektrodynamicznych. Aby zredukować liczbę równań opisujących pole elektromagnetyczne, wykorzystano opis pola za pomocą magnetycznego potencjału wektorowego \mathbf{A} i skalarnego potencjału elektrycznego V .

Analizę pola elektromagnetycznego przeprowadzono na podstawie równania (4.1) i (4.2). W nagrzanym wsadzie obliczono gęstość prądu \mathbf{J} (4.4) i rozkład \mathbf{B} (4.3). Moc czynną wyliczono na podstawie (4.5).

$$\nabla^2 \mathbf{A} - j\omega\sigma\mu \mathbf{A} = \sigma\mu \nabla V_e, \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \nabla V_e = 0, \quad (4.2)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (4.3)$$

$$\mathbf{J} = -j\omega\sigma\mu \mathbf{A} , \quad (4.4)$$

$$\mathbf{P}_{EM} = \frac{1}{2} \frac{|J|^2}{\sigma} dV, \quad (4.5)$$

$$I_s = \mu \iint_S J dS \quad (4.6)$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{A} = 0 \quad (4.7)$$

gdzie:

- \mathbf{A} - magnetyczny potencjał wektorowy,
- j - jednostka urojona,
- ω - częstość kątowna,
- σ - przewodność elektryczna,
- μ - przenikalność magnetyczna,
- V_e - potencjał elektryczny,
- \mathbf{B} - indukcja magnetyczna,
- \mathbf{J} - gęstość prądu,
- \mathbf{P}_{EM} - moc czynna,
- I_s - prąd źródłowy,
- S - powierzchnia

Wnikanie pola elektromagnetycznego w materiał przewodzący stanowi istotny aspekt w dziedzinie elektromagnetyki, a zrozumienie tego procesu jest kluczowe w wielu dziedzinach, takich jak telekomunikacja, elektronika, i przemysł. Wzór (4.8), wyrażający głębokość wnikania pola elektromagnetycznego δ , wskazuje, że głębokość wnikania pola zależy od częstości kątownej pola ω , przewodności materiału σ i przenikalności magnetycznej materiału, do którego pole wnika μ . Razem te parametry tworzą matematyczny

opis tego, jak pole elektromagnetyczne przenika przez materiały przewodzące, co ma fundamentalne znaczenie w projektowaniu układów elektronicznych i analizie właściwości materiałów w kontekście elektromagnetyki. W przedstawionej pracy głębokość wnikania pola jest istotna ze względu na dokonanie podziału modelu metodą elementów skończonych. Znając δ dla określonego zestawu parametrów wiadomo, jak gęstą siatkę należy dobrać, żeby rozwiązanie było zadowalającej jakości.

$$\delta = \sqrt{2/(\omega \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \mu)} \quad (4.8)$$

4.1.2 Siła wznosząca

Siła Lorentza jest jednym z fundamentalnych zjawisk w elektromagnetyce, wynikającym z interakcji między naładowanymi cząstkami a polami elektrycznym i magnetycznym (4.9). Jednym z kluczowych aspektów tego zjawiska jest gęstość prądu, która odgrywa istotną rolę w określeniu siły Lorentza działającej na cząstkę.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (4.9)$$

gdzie:

- \mathbf{F} jest wektorem siły Lorentza,
- q oznacza ładunek cząstki,
- \mathbf{E} to wektor pola elektrycznego,
- \mathbf{v} reprezentuje wektor prędkości cząstki,
- \mathbf{B} jest wektorem indukcji magnetycznej.

Gęstość prądu elektrycznego, oznaczana jako \vec{J} , opisuje przepływ ładunków elektrycznych w przestrzeni. Jest to wektorowa wielkość, która wyraża ilość ładunku elektrycznego przenoszonego przez jednostkową powierzchnię w jednostce czasu. Możemy ją zdefiniować jako (4.10).

$$\vec{J} = \rho \vec{v} \quad (4.10)$$

Gdzie ρ to gęstość ładunku elektrycznego, a \vec{v} to prędkość ruchu cząstek przenoszących ten ładunek. W kontekście siły Lorentza, gęstość prądu elektrycznego odgrywa istotną rolę, gdyż wpływa na to, jak cząstka oddziałuje z polem magnetycznym.

Jeśli cząstka porusza się wzdłuż linii pola magnetycznego, to gęstość prądu \vec{J} jest równoległa do pola magnetycznego, co oznacza, że siła Lorentza nie działa na nią w tym kierunku. Jednak, jeśli cząstka ma składową prędkości prostopadłą do linii pola magnetycznego, to siła Lorentza jest skierowana prostopadle zarówno do kierunku ruchu cząstki, jak i do linii pola magnetycznego. Warto zaznaczyć, że kierunek siły Lorentza jest prostopadły zarówno do kierunku gęstości prądu \vec{J} jak i do pola magnetycznego.

Jeśli natomiast cząstka posiada składową prędkości równoległą do linii pola magnetycznego, siła Lorentza działa wyłącznie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny utworzonej przez prędkość \vec{v} i pole magnetyczne. To właśnie gęstość prądu elektrycznego \vec{J} określa, w jaki sposób siła Lorentza wpływa na ruch cząstki w tym przypadku.

Podsumowując, gęstość prądu elektrycznego \vec{J} jest kluczowym czynnikiem w analizie siły Lorentza działającej na naładowane cząstki poruszające się w polu magnetycznym, a jej kierunek i składowa mają istotny wpływ na charakter tego oddziaływania.

W ośrodkach ciągłych równanie 4.9 przyjmuje postać 4.11. Dla przewodników z prądem składową magnetyczną siły Lorentza nazywamy siłą elektrodynamiczną. Sprowadza to wzór do postaci 4.12.

$$\mathbf{F} = \int_V (\rho \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV. \quad (4.11)$$

$$\mathbf{F} = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV. \quad (4.12)$$

Dla elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego lewitacja wsadu wewnątrz wzbudnika jest najbardziej charakterystycznym elementem procesu. Siła elektrodynamiczna pełni rolę siły wznoszącej, która ma przeciwny zwrot to siły grawitacji. Jeżeli te dwie siły się równoważą, to wsad powinien lewitować w danej pozycji. Siłę działającą na wsad można obliczyć według równania 4.14.

$$\mathbf{f}_{EM} = \frac{1}{2} \text{Re} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}^*) \quad (4.13)$$

$$\mathbf{F}_{EM} = \int_V \mathbf{f}_{EM} dV \quad (4.14)$$

gdzie:

- f_{EM} - gęstość objętościowa siły elektrodynamicznej,
- J - gęstość prądu,
- B - indukcja magnetyczna,
- F_{EM} - siła elektrodynamiczna,

4.2 Opis pola temperatury

4.2.1 Uproszczona analiza temperatury wsadu

Do analizy najlepszego wariantu w rozdziale 7 wykorzystano uproszczone obliczenia temperaturowy obejmujące tylko zmiany we wsadzie. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z równaniami (4.15)–(4.17) dla temperatury początkowej 20°C. Energię potrzebną do stopienia wsadu uzyskano z (4.15).

$$E_M = E_H + E_L, \quad (4.15)$$

gdzie:

- E_H to energia potrzebna do podniesienia temperatury do temperatury topnienia,
- E_L jest energią ciepła utajonego.

Obliczenia E_H i E_L są oparte na (4.16) i (4.17).

$$E_H = C \cdot m \cdot \Delta T, \quad (4.16)$$

gdzie:

- C to pojemność cieplna właściwa,

- m jest masą wsadu,
- ΔT to różnica między temperaturą początkową a temperaturą topnienia.

$$E_L = L_H \cdot m, \quad (4.17)$$

gdzie:

- L_H jest ciepłem utajonym.

4.2.2 Pole temperatury

Dla modelu przedstawionego w rozdziale 5.3 przeprowadzono bardziej zaawansowaną analizę pola temperatury. Obejmuje ona zarówno wsad jak i jego bezpośrednie otoczenie.

Równanie Fouriera-Kirchhoffa (4.18) jest jednym z kluczowych narzędzi w dziedzinie przewodnictwa cieplnego, umożliwiającym analizę przepływu ciepła w ciałach stałych. To równanie jest matematycznym opisem procesu przewodnictwa cieplnego i stanowi punkt wyjścia do zrozumienia, jak ciepło przemieszcza się w materiałach.

W równaniu Fouriera-Kirchhoffa nie występuje w sposób jawny ciepło przemian fazowych pojawiające się w procesie topienia i krzepnięcia. Można to ciepło uwzględnić obliczeniowo co najmniej na dwa sposoby, albo w postaci zmodyfikowanej charakterystyki ciepła właściwego c , albo w za pomocą dodatkowego "źródła ciepła" zawartego w wielkości q . W wykorzystywanym programie obliczeniowym ciepło utajone zostało uwzględnione w postaci opisanej wzorem (4.19).

Rozszerzone równanie pozwala uwzględnić efekty ciepła utajonego w analizie przewodnictwa cieplnego, co jest istotne w badaniach nad materiałami poddawanych przemianom fazowym, takimi jak stopień topienia lub krzepnięcia.

Straty ciepła podczas topienia powstają z dwóch głównych powodów: promieniowania (4.20) i konwekcji modelowanej z użyciem dynamiki płynów opisanej szerzej w podrozdziale 4.3. Należy podkreślić, że każda zmiana temperatury modyfikuje właściwości wsadu i wymaga ponownego obliczenia mocy indukowanej we wsadzie. Prowadzi to do konieczności iteracyjnego podejścia do obliczeń EM-T (zgodnie z rysunkiem 4.1).

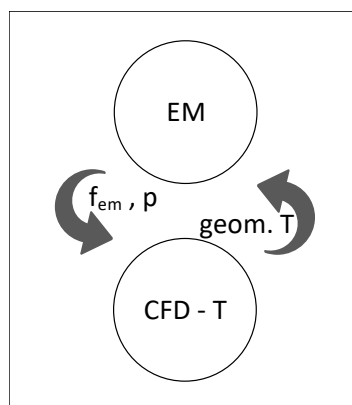
$$k \nabla^2 T + q = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (4.18)$$

$$k\nabla^2 T + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho L \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4.19)$$

$$-k \frac{dT}{dn} = \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (4.20)$$

gdzie:

- k - konduktywność cieplna,
- T - temperatura,
- q - gęstość objętościowa źródła ciepła,
- ρ - gęstość,
- c - pojemność cieplna właściwego,
- L - ciepło utajone przemiany fazowej,
- ϕ - stopień przemiany fazowej, który zmienia się od 0 do 1.



Rysunek 4.1: Zależności pomiędzy polami fizycznymi podczas topienia lewitacyjnego. EM oznacza pole elektromagnetyczne; $CFD - T$ odnosi się do dynamiki płynów i obliczeń temperatury; $geom.T$ to zmiana geometrii i temperatury, po obliczeniu $CFD - T$; f_{em} to gęstość siły elektromagnetycznej, a p odpowiada wartości gęstości objętościowej mocy czynnej uzyskanej z obliczeń pola EM ;

Zjawisko oddawania ciepła przez radiację komplikuje się w przypadku jeżeli obiekt oddający ciepło nie emituje energii do otwartej półprzestrzeni, a jest otoczony innymi

elementami pochłaniającymi / odbijającymi promieniowanie. W tym drugim przypadku należy uwzględnić obecność tych dodatkowych elementów (w rozważanym przypadku wzбудnika), bo ograniczają one oddawanie ciepła przez radiację. W rozważanej pracy wszędzie gdzie modelowano radiację, odbywało się to jako oddawanie ciepła do półprzestrzeni.

Dla obliczeń, w których brano pod uwagę konwekcyjną wymianę ciepła, ustanowiono konwekcję naturalną. Konwekcja naturalna to taka, w której płyn porusza się w obrębie domeny obliczeniowej przez zmiany gęstości płynu z powodu zmian temperatury. Warunki brzegowe na skraju obszaru obliczeniowego w tym przypadku określa się różnie w zależności od położenia granicy w przestrzeni. Dla ściany pionowej bocznej jest to (4.21) [1], dla górnej powierzchni (4.22, 4.23 i 4.24) [1], natomiast dla dolnej ściany (4.25) [1]. Te równania są używane do obliczania średniego współczynnika wymiany ciepła (h_{avg}) dla różnych konfiguracji ścian, biorąc pod uwagę naturalną konwekcję.

$$h_{\text{avg}} = \frac{k}{L} \left[0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \quad (4.21)$$

Dla ($Ra_L < 10^4$):

$$h_{\text{avg}} = 0,425 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,33} \quad (4.22)$$

Dla ($10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$):

$$h_{\text{avg}} = \frac{0,54k Ra_L^{0,25}}{L} \quad (4.23)$$

Dla ($10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$):

$$h_{\text{avg}} = \frac{0,15k Ra_L^{0,3333}}{L} \quad (4.24)$$

Dla $Ra_L < 10^5$:

$$h_{\text{avg}} = 0,83(\Delta T)^{0,33} \quad (4.25)$$

gdzie:

- Pr – liczba Prandtla płynu
- Ra_L – liczba Rayleigha przepływu

- L – długość powierzchni w kierunku przepływu
- ΔT – różnica temperatur
- k – przewodność cieplna płynu

4.3 Dynamika płynów

4.3.1 Ośrodki ściśliwe

W niniejszym sekcji omówiono znaczenie konwekcyjnej wymiany ciepła w procesie topienia, szczególnie w kontekście gazów. Zostały one wykorzystane w 5.3 w którym do uwzględnienia konwekcyjnej wymiany ciepła w modelu EM-T wykorzystano dynamikę płynów. Konwekcja dla ośrodków ściśliwych została zasymulowana przy użyciu dynamiki płynów obliczonej na podstawie następujących równań:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \nu) = 0 \quad (4.26)$$

$$\frac{d(\rho \nu)}{dt} + \nabla \cdot (\rho \nu \nu) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho g \quad (4.27)$$

$$\bar{\tau} = \eta \cdot (\nabla \nu + \nabla \nu^T) - \eta \frac{2}{3} \nabla \nu I \quad (4.28)$$

$$\frac{d(\rho W)}{dt} + \nabla \cdot (\nu(\rho W + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{ef} \nabla T + \bar{\tau}_{ef} \cdot \nu) \quad (4.29)$$

$$W = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\nu^2}{2} \quad (4.30)$$

gdzie:

- ρ - gęstość płynu,
- ν - wektor prędkości,
- p - ciśnienie statyczne,

- g – przyspieszenie grawitacyjne,
- η – lepkość molekularna,
- I – tensor jednostkowy,
- ρW – gęstość energii,
- λ_{ef} – efektywna przewodność składająca się z przewodności i przewodności spowodowanej turbulencjami.

Równanie (4.26) jest równaniem zachowania masy, zwanym również równaniem ciągłości; drugim równaniem jest równanie zachowania pędu (4.27). Równanie (4.29) jest równaniem zachowania energii w układzie. Analiza pola przepływu została przeprowadzona przy użyciu metod numerycznych. Modelowanie przepływu napotyka wiele trudności. Dlatego, aby przeprowadzić taką analizę bezpośrednio, w oparciu o równania (4.26) i (4.27), uzupełnione o ruchy turbulenty (4.28), przy użyciu metody bezpośredniej symulacji numerycznej, należy zastosować bardzo gęste siatki (liczba węzłów proporcjonalna do $Re^{\frac{9}{4}}$).

Aby zmniejszyć liczbę zmiennych i zamknąć układ równań, należy wprowadzić odpowiedni model turbulencji. Model dwurównaniowy [2] uzupełnia się o dodatkowe równania, które opisują transport energii kinetycznej k i transport szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ϵ . Równania te wymagają wprowadzenia dodatkowych współczynników empirycznych, ale pozwalają zamknąć układ równań opisujących ruch płynu. Z modelu $k - \epsilon$ [114], lepkość efektywną można wyznaczyć poprzez podstawienie równania (4.32) do równania (4.31):

$$\eta_{ef} = \eta + \eta_t \quad (4.31)$$

$$\eta_t = \rho C \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.32)$$

gdzie:

- η_{ef} – lepkość efektywna,
- η – lepkość dynamiczna,
- η_t – lepkość turbulentna,

- k – energia kinetyczna turbulencji,
- ϵ – współczynnik rozpraszania energii turbulencji,
- C – stała empiryczna.

Główną zaletą modelu k - ϵ jest to, że daje on bardzo dobre wyniki dla wielu realistycznych przepływów o znaczeniu technicznym.

4.3.2 Ośrodki nieściśliwe

W tej sekcji skoncentrowano się na odkształcaniu się wsadu, jest to więc wariant dla ośrodków nieściśliwych, które zmienia geometrię pod wpływem zmiennego pola elektromagnetycznego.

Model hydrodynamiczny (zaimplementowany w oprogramowaniu Ansys Fluent) oparty jest na równaniu zachowania pędu Naviera-Stokesa (4.33), w którym jednym z członów źródłowych jest objętościowa gęstość siły Lorentza f_{EL} działająca na ciekły metal, dostarczana przez model elektromagnetyczny:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \eta_{eff} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_{EL} + \mathbf{f}_S + \rho \mathbf{g} + f_C \quad (4.33)$$

gdzie:

- ρ - gęstość płynu,
- \mathbf{v} - prędkość płynu,
- p - ciśnienie,
- η_{eff} - efektywna lepkość określona na podstawie modelu turbulencji $k - \omega$,
- \mathbf{f}_S - napięcie powierzchniowe,
- \mathbf{g} - grawitacja.

f_C jest siłą odpowiedzialną za stabilizację pozycji wsadu w przestrzeni. Pozwala ona na odkształcanie się ciekłego wsadu, ale nie pozwala na opuszczenie przestrzeni z zagęszczoną siatką modelu. Siłę f_C można obliczyć na podstawie równania (4.34).

$$f_C = \int \left(\frac{f_{EL} + \rho \mathbf{g}}{V_m} \right) dV \quad (4.34)$$

gdzie:

- V_m - objętość ciekłego metalu

Przepływ w systemie lewitacyjnym modelowano jako przepływ wielofazowy ze swobodną powierzchnią. Aby zasymulować ten proces, zastosowano klasyczną metodę Volume of Fluid (VOF) [49]. Aby śledzić ewolucję swobodnej powierzchni ciekłego metalu, rozwiązano równanie zachowania ułamka objętościowego dla jednej z faz (4.35).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}) = 0 \quad (4.35)$$

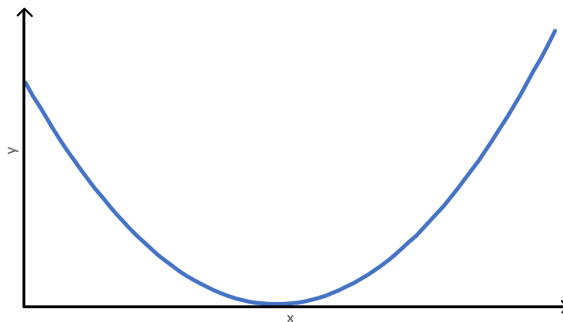
W podejściu VOF, właściwości materiałowe występujące w równaniu, gęstość ρ w równaniu 4.33) określano na podstawie średniej ważonej ułamka objętościowego i właściwości każdej fazy. Po odtworzeniu kształtu interfejsu między ciekłym metalem a powietrzem dla bieżącego rozkładu fazowego metodą VOF [49], określano napięcie powierzchniowe, które było dodatkowym członem źródłowym \mathbf{f}_S w równaniu (4.33).

Modelowanie napięcia powierzchniowego zaimplementowano jako siłę powierzchniową w równaniu zachowania pędu wyrażoną jako siła masowa, przy użyciu twierdzenia o dywergencji [15].

4.4 Przegląd metod optymalizacji

4.4.1 Przeszukiwanie lokalne

W ramach pracy doktorskiej przeprowadzono proces optymalizacji, a wybór algorytmu optymalizacji może mieć istotny wpływ na wynik. W przypadku znacznej liczby parametrów i długiego czasu symulacji, znaczenie tego wyboru rośnie. W tej sekcji dokonano przeglądu metod wyszukiwania lokalnego. W tej części pracy przedstawiono najbardziej popularne z nich. Wyszukiwanie lokalne zakłada, że dla funkcji ciągłej pierwsze pochodne w wybranym przedziale mają tylko jeden pierwiastek. Oznacza to, że funkcja ma jedno ekstremum lokalne w zadanym przedziale. Przykładowa funkcja z tylko jednym ekstremum jest przedstawiona na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2: Wizualizacja przykładowej funkcji z pojedynczym ekstremum.

Metody poszukiwania optimum w wielu kierunkach

Metoda Gaussa-Seidla [122, 128] jest iteracyjną techniką stosowaną do rozwiązywania układów równań liniowych oraz optymalizacji funkcji wielu zmiennych. Jest to algorytm, który iteracyjnie aktualizuje wartości zmiennych, dążąc do poszukiwania ekstremum funkcji celu.

Metoda Gaussa-Seidla opiera się na kilku kluczowych założeniach:

- Funkcja celu $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ jest ciągła i różniczkowalna.
- Algorytm wymaga znajdowania punktów stacjonarnych poprzez rozwiązywanie układów równań liniowych.
- W przypadku układów równań liniowych, macierz współczynników jest diagonalnie dominująca lub dodatnio określona, co gwarantuje zbieżność metody.

Algorytm Gaussa-Seidla można opisać następującymi krokami:

- Krok 1: Inicjalizacja Wybieramy punkt początkowy $\mathbf{x}_0 = [x_0^1, x_0^2, \dots, x_0^n]^T \in \mathbb{R}^n$.
- Krok 2: Aktualizacja zmiennych Dla każdej zmiennej x^i (gdzie $i = 1, 2, \dots, n$), optymalizujemy funkcję celu f względem x^i , przy założeniu, że pozostałe zmienne są utrzymywane na stałych wartościach z poprzedniej iteracji:

$$x_k^i = \arg \min_{x^i} f(x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^{i-1}, x^i, x_k^{i+1}, \dots, x_k^{n-1})$$

gdzie x_k^i oznacza wartość x^i w k -tej iteracji.

- Krok 3: Sprawdzenie zbieżności Jeśli spełnione są kryteria zbieżności, tj. różnica między kolejnymi wartościami funkcji celu lub wektorem zmiennych jest mniejsza od zadanej tolerancji ϵ , algorytm kończy działanie:

$$\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\| < \epsilon$$

W przeciwnym razie wracamy do Kroku 2.

Metoda Gaussa-Seidla posiada kilka istotnych właściwości:

- Prostota implementacji: Algorytm jest prosty do zaimplementowania i wymaga jedynie podstawowych operacji arytmetycznych.
- Iteracyjność: Metoda aktualizuje zmienne sukcesywnie, co pozwala na uzyskiwanie przybliżonych rozwiązań po każdej iteracji.
- Zbieżność: W przypadku macierzy diagonalnie dominujących lub dodatnio określonych, metoda gwarantuje zbieżność do rozwiązania.

Metoda Powella [53,118,148], zaproponowana przez Michaela J.D. Powella w 1964 roku, jest techniką optymalizacji, która nie wymaga obliczania pochodnych funkcji celu. Algorytm jest szczególnie użyteczny w przypadkach, gdy pochodne są trudne lub niemożliwe do obliczenia.

Metoda optymalizacji Powella jest jedną z metod, stosowaną do poszukiwania ekstremum funkcji wielu zmiennych. Jest to algorytm deterministyczny, który iteracyjnie przeszukuje przestrzeń rozwiązań, wykorzystując kierunki poszukiwania, które są sukcesywnie ortogonalizowane.

Metoda Powella opiera się na kilku kluczowych założeniach:

- Funkcja celu $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ jest ciągła.
- Funkcja celu jest ograniczona z dołu, tj. istnieje $f_{\min} \in \mathbb{R}$ takie, że $f(\mathbf{x}) \geq f_{\min}$ dla wszystkich $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$.
- Algorytm nie wymaga obliczania gradientu $\nabla f(\mathbf{x})$, ale zakłada możliwość znajdowania ekstremum wzdłuż kierunku w przestrzeni poszukiwań.

Algorytm Powella można opisać następującymi krokami:

- Krok 1: Inicjalizacja Wybieramy punkt początkowy $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n$ oraz zestaw n liniowo niezależnych wektorów kierunkowych $\{\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n\}$.
- Krok 2: Optymalizacja wzdłuż kierunków Dla każdego kierunku \mathbf{d}_i optymalizujemy funkcję celu wzdłuż tego kierunku, aktualizując punkt:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \alpha_i \mathbf{d}_i$$

gdzie α_i jest skalar, który optymalizuje $f(\mathbf{x}_i + \alpha \mathbf{d}_i)$.

- Krok 3: Aktualizacja kierunków Po przeszukaniu wszystkich kierunków, aktualizujemy wektor:

$$\mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_0$$

i usuwamy pierwszy kierunek:

$$\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n \leftarrow \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3, \dots, \mathbf{d}_{n+1}$$

- Krok 4: Sprawdzenie zbieżności Jeśli spełnione są kryteria zbieżności, tj. różnica między kolejnymi wartościami funkcji celu jest mniejsza od zadanej tolerancji ϵ , algorytm kończy działanie. W przeciwnym razie wracamy do Kroku 2.

Metoda Powella posiada kilka istotnych właściwości:

- Może nie być gradientowa: Metoda może działać bez potrzeby obliczania pochodnych funkcji celu, co czyni ją odpowiednią dla problemów, gdzie gradienty są niedostępne.
- Kierunki poszukiwań: Algorytm wykorzystuje sukcesywnie ortogonalizowane kierunki poszukiwań, co umożliwia efektywne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań.
- Zbieżność: Metoda Powella zapewnia zbieżność do lokalnego ekstremum, jednak zbieżność globalna nie jest gwarantowana.

Poszukiwanie ekstremum w określonym kierunku

Jednym z najprostszych sposobów poszukiwania ekstremum jest **metoda bisekcji** [101,108,141], znana również jako metoda połowienia przedziału, jest jednym z fundamentalnych algorytmów numerycznych służących do znajdowania ekstremów funkcji

jednej zmiennej. Metoda ta jest szczególnie użyteczna w przypadkach, gdy funkcja jest ciągła i unimodalna na zadanym przedziale.

Metoda bisekcji wymaga spełnienia następujących założeń:

- Funkcja $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ jest ciągła na przedziale $[a, b]$.
- Funkcja f jest unimodalna na przedziale $[a, b]$, co oznacza, że istnieje punkt $x^* \in (a, b)$, dla którego f jest niemalejąca na $[a, x^*]$ i nierosnąca na $[x^*, b]$.

Algorytm bisekcji w wersji do poszukiwania minimum funkcji przebiega według następujących kroków:

1. Wybieramy początkowy przedział $[a_0, b_0]$, na którym będziemy szukać ekstremum funkcji f .
2. Wyznaczamy środek przedziału:

$$m = \frac{a + b}{2}.$$

3. Obliczamy wartości funkcji w punktach a , m i b :

$$f(a), \quad f(m), \quad f(b).$$

4. Jeśli $f(m) < f(a)$ i $f(m) < f(b)$, to przeszukujemy przedział $[a, m]$.
5. Jeśli $f(a) < f(m)$ i $f(m) < f(b)$, to przeszukujemy przedział $[a, m]$.
6. Jeśli $f(a) > f(m)$ i $f(m) > f(b)$, to przeszukujemy przedział $[m, b]$.
7. Krok 2-6 powtarzamy aż do osiągnięcia zadowalającej dokładności, tj. dopóki długość przedziału $[a, b]$ nie będzie mniejsza od zadanej tolerancji ϵ .

Metoda bisekcji ma następujące właściwości:

- Zbieżność: Metoda bisekcji jest zbieżna liniowo, co oznacza, że długość przedziału zmniejsza się wykładniczo w każdej iteracji:

$$b_{n+1} - a_{n+1} = \frac{1}{2}(b_n - a_n).$$

- Prostota implementacji: Algorytm jest łatwy do implementacji i nie wymaga obliczeń pochodnych funkcji.
- Ograniczenia: Metoda jest efektywna tylko dla funkcji unimodalnych na zadanym przedziale. Ponadto zbieżność liniowa oznacza, że dla bardzo dużej dokładności może wymagać wielu iteracji.

Metoda Falsi Regula [5, 28, 132], zwana również metodą fałszywej pozycji, jest klasycznym algorytmem numerycznym stosowanym do znajdowania ekstremów funkcji jednej zmiennej. Jest to metoda iteracyjna, która korzysta z liniowej interpolacji w celu zawężenia przedziału, w którym znajduje się ekstremum. W tej części przedstawiono opis tej metody, wraz z matematycznymi podstawami oraz właściwościami.

Metoda Falsi Regula wymaga spełnienia następujących założeń:

- Funkcja $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ jest ciągła na przedziale $[a, b]$.
- Funkcja f jest unimodalna na przedziale $[a, b]$, co oznacza, że istnieje punkt $x^* \in (a, b)$, dla którego f jest niemalejąca na $[a, x^*]$ i nierosnąca na $[x^*, b]$.

Algorytm Falsi Regula do poszukiwania minimum funkcji przebiega według następujących kroków:

1. Wybieramy początkowy przedział $[a_0, b_0]$, na którym będziemy szukać ekstremum funkcji f .
2. Wyznaczamy punkt przecięcia prostej przechodzącej przez $(a, f(a))$ i $(b, f(b))$ z osią x :

$$c = a - \frac{f(a)(b - a)}{f(b) - f(a)}.$$

3. Obliczamy wartość funkcji w punkcie c :

$$f(c).$$

4. Jeśli $f(c) < f(a)$ i $f(c) < f(b)$, to przeszukujemy przedział $[a, c]$.
5. Jeśli $f(a) < f(c)$ i $f(c) < f(b)$, to przeszukujemy przedział $[a, c]$.
6. Jeśli $f(a) > f(c)$ i $f(c) > f(b)$, to przeszukujemy przedział $[c, b]$.

7. Krok 2-6 powtarzamy aż do osiągnięcia zadowalającej dokładności, tj. dopóki długość przedziału $[a, b]$ nie będzie mniejsza od zadanej tolerancji ϵ .

Metoda Falsi Regula ma następujące właściwości:

- **Zbieżność:** Metoda Falsi Regula jest zbieżna, chociaż jej szybkość zbieżności zależy od kształtu funkcji i może być wolniejsza w porównaniu do innych metod numerycznych.
- **Prostota implementacji:** Algorytm jest łatwy do implementacji i nie wymaga obliczeń pochodnych funkcji.
- **Stabilność:** Metoda ta jest bardziej stabilna niż metoda bisekcji, ponieważ korzysta z informacji o nachyleniu funkcji.

Metoda Newtona [30, 31, 127], jest jedną z najważniejszych metod numerycznych służących do znajdowania ekstremów funkcji jednej lub wielu zmiennych. Metoda ta wykorzystuje pochodne funkcji do iteracyjnego znajdowania punktów krytycznych, które są potencjalnymi ekstremami. W tej sekcji przedstawiono opis tej metody, wraz z matematycznymi podstawami oraz właściwościami.

Metoda Newtona wymaga spełnienia następujących założeń:

- Funkcja $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ jest dwukrotnie różniczkowalna na przedziale $[a, b]$.
- Istnieje punkt $x^* \in (a, b)$, który jest ekstremum lokalnym funkcji f .
- Druga pochodna $f''(x)$ jest ciągła i nie zeruje się w sąsiedztwie punktu x^* .

Algorytm Metody Newtona do poszukiwania minim funkcji przebiega według następujących kroków:

1. Wybieramy początkowy punkt x_0 , który jest przybliżeniem do punktu x^* .
2. Iteracyjnie aktualizujemy wartość x według wzoru:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f'(x_n)}{f''(x_n)}.$$

3. Powtarzamy krok 2 do osiągnięcia zadowalającej dokładności, tj. dopóki wartość $|x_{n+1} - x_n|$ nie będzie mniejsza od zadanej tolerancji ϵ .

Metoda Newtona ma następujące właściwości:

- **Zbieżność:** Metoda Newtona jest zbieżna kwadratowo, pod warunkiem że początkowe przybliżenie jest dostatecznie bliskie rzeczywistego ekstremum.
- **Efektywność:** Dzięki szybkiemu tempo zbieżności metoda Newtona jest bardzo efektywna i wymaga mniejszej liczby iteracji w porównaniu do innych metod, takich jak metoda bisekcji czy metoda Falsi Regula.
- **Ograniczenia:** Metoda Newtona wymaga obliczeń pierwszej i drugiej pochodnej funkcji, co może być trudne lub niemożliwe dla niektórych funkcji. Ponadto metoda może nie być zbieżna, jeśli początkowe przybliżenie jest zbyt odległe od rzeczywistego ekstremum lub jeśli druga pochodna w okolicy ekstremum jest bliska zeru.

Metoda podziału [126], znana również jako metoda złotego podziału, jest jednym z algorytmów numerycznych służących do znajdowania ekstremów funkcji jednej zmiennej. Metoda ta opiera się na zasadach podziału przedziału w taki sposób, aby iteracyjnie zawężać przedział poszukiwań, korzystając z właściwości złotej proporcji. W tym fragmencie przedstawiono opis tej metody, wraz z matematycznymi podstawami, właściwościami oraz zastosowaniami.

Metoda podziału wymaga spełnienia następujących założeń:

- Funkcja $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ jest ciągła na przedziale $[a, b]$.
- Funkcja f jest unimodalna na przedziale $[a, b]$, co oznacza, że istnieje punkt $x^* \in (a, b)$, dla którego f jest niemalejąca na $[a, x^*]$ i nierosnąca na $[x^*, b]$.

Algorytm metody podziału do poszukiwania minim funkcji przebiega według następujących kroków:

1. Wybieramy początkowy przedział $[a_0, b_0]$ oraz tolerancję ϵ .
2. Obliczamy punkty wewnętrzne przedziału:

$$x_1 = b - \frac{b-a}{\varphi}, \quad x_2 = a + \frac{b-a}{\varphi},$$

gdzie $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ jest złotą proporcją.

3. Obliczamy wartości funkcji w punktach x_1 i x_2 :

$$f(x_1), \quad f(x_2).$$

4. Jeśli $f(x_1) > f(x_2)$, to ustawiamy $a = x_1$. W przeciwnym razie ustawiamy $b = x_2$.

5. Krok 2-4 powtarzamy aż do osiągnięcia zadowalającej dokładności, tj. dopóki długość przedziału $[a, b]$ nie będzie mniejsza od zadanej tolerancji ϵ .

Metoda podziału ma następujące właściwości:

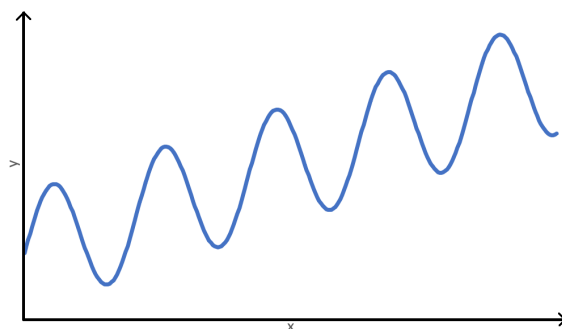
- Zbieżność: Metoda podziału jest zbieżna liniowo, co oznacza, że długość przedziału zmniejsza się wykładniczo w każdej iteracji:

$$b_{n+1} - a_{n+1} = \frac{1}{\varphi}(b_n - a_n).$$

- Prostota implementacji: Algorytm jest prosty do implementacji i nie wymaga obliczeń pochodnych funkcji.
- Efektywność: Dzięki zastosowaniu złotej proporcji metoda ta minimalizuje liczbę obliczeń funkcji, co czyni ją efektywną w porównaniu do innych metod.

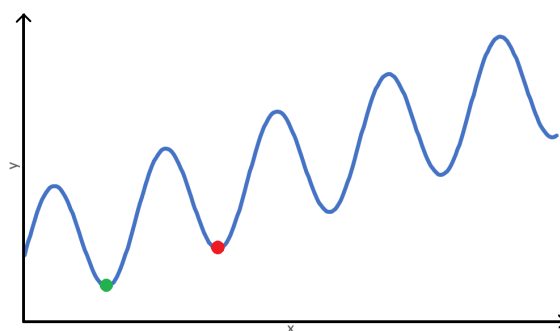
4.4.2 Przeszukiwanie globalne

Wyszukiwanie globalne pozwala znaleźć globalne optimum dla funkcji z wieloma pierwiastkami w pierwszych pochodnych funkcji. Pozwala to na badanie zjawisk, które mają skomplikowane modele. Przykładowa funkcja wielomodalna została przedstawiona na rysunku 4.3.



Rysunek 4.3: Wizualizacja funkcji z wieloma ekstremami.

Gdyby zastosować strategię przeszukiwania lokalnego do poszukiwania optimum dla funkcji wielomodalnych, może to doprowadzić do znalezienia rozwiązania suboptymalnego w miejsce optymalnego. Rozwiązanie suboptymalne będzie rozumiane zgodnie z definicją ze słownika języka polskiego jako rozwiązanie "niewystarczające, nie najlepsze z możliwych w jakichś warunkach". Wizualizacje rozwiązania suboptymalnego przy poszukiwaniu ekstremum funkcji celu, w określonych granicach przedstawiono na rysunku 4.4.



Rysunek 4.4: Przykładowa funkcja celu w zadanych granicach z zaznaczonym na zielono rozwiązaniem optymalnym i zaznaczonym na czerwono rozwiązaniem suboptymalnym.

Symulowane wyżarzanie (Simulated Annealing - SA) [6, 62, 142] jest częścią optymalizacji stochastycznej i dziedziny metaheurystycznej. Ta strategia optymalizacji została zainspirowana przez proces wyżarzania metalu, który obejmuje sekwencyjne ogrzewanie i chłodzenie materiału. Celem wyżarzania jest uzyskanie struktury krystalicznej bez defektów w materiale, co zapewnia poprawę trwałości i wytrzymałości. W niniejszym fragmencie przedstawiono założenia, opis algorytmu oraz właściwości.

SA jest oparta na kilku kluczowych założeniach:

- Funkcja celu: $f(x)$, którą chcemy zoptymalizować.
- Przestrzeń poszukiwań: Zbiór wszystkich możliwych rozwiązań.
- Punkt początkowy: Początkowe rozwiązanie x_0 .
- Temperatura początkowa: Wysoka wartość początkowa temperatury T_0 .
- Schemat chłodzenia: Funkcja opisująca, jak temperatura zmienia się w kolejnych iteracjach, np. $T_{k+1} = \alpha T_k$, gdzie $0 < \alpha < 1$.

Algorytm symulowanego wyżarzania można opisać następująco:

1. Inicjalizacja: Ustaw początkowe rozwiązanie x_0 oraz początkową temperaturę T_0 .
2. Iteracja: Dla każdej iteracji k :
 - (a) Wybierz nowe rozwiązanie x' w sąsiedztwie x_k .
 - (b) Oblicz zmianę wartości funkcji celu: $\Delta E = f(x') - f(x_k)$.
 - (c) Jeśli $\Delta E \leq 0$, zaakceptuj nowe rozwiązanie: $x_{k+1} = x'$.
 - (d) Jeśli $\Delta E > 0$, zaakceptuj nowe rozwiązanie z prawdopodobieństwem:

$$P(\Delta E) = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T_k}\right). \quad (4.36)$$

- (e) Zaktualizuj temperaturę: $T_{k+1} = \alpha T_k$.
3. Zakończenie: Powtórz iterację aż do osiągnięcia warunku zakończenia, np. T bliskie zero lub brak znaczących zmian w wartości funkcji celu.

Symulowane wyżarzanie posiada następujące właściwości:

- Zbieżność: Przy odpowiednim schemat chłodzenia, SA jest w stanie znaleźć globalne ekstremum funkcji celu.
- Elastyczność: Może być stosowane do różnorodnych problemów optymalizacyjnych, w tym tych o wielowymiarowych i nieliniowych przestrzeniach poszukiwań.
- Odporność na ekstrema lokalne: Dzięki probabilistycznemu przyjęciu gorszych rozwiązań, SA może unikać utkwienia w lokalnych ekstremach.

Optymalizacja pod nadzorem nauczyciela (Teaching Learning Based Optimization - TLBO) [26, 54, 55] jest metaheurystyczną metodą optymalizacyjną inspirowaną procesem edukacyjnym, gdzie jednostki populacji są traktowane jako uczniowie i nauczyciele. Ideą TLBO jest iteracyjne usprawnianie rozwiązań poprzez modelowanie procesu nauczania i uczenia się.

Metoda TLBO opiera się na kilku kluczowych założeniach:

- Populacja parametrów: Zbiór możliwych zestawów parametrów podlegających optymalizacji.

- Funkcja celu: $f(\vec{x})$, dla której chcemy znaleźć ekstremum.
- Zestaw nauczycielski: Zestaw parametrów, który obecnie daje najlepsze wyniki.
- Zestawy uczniowskie: Pozostałe zestawy parametrów, które są aktualizowane na podstawie nauczyciela.
- Warunki końcowe: Algorytm kończy działanie, gdy spełniony jest warunek stopu, np. osiągnięcie maksymalnej liczby iteracji.

Algorytm TLBO można opisać w następujących krokach:

1. Inicjalizacja: Wygeneruj początkowe zestawy parametrów dla wszystkich jednostek populacji.
2. Ocena: Oblicz wartość funkcji celu dla każdego zestawu parametrów.
3. Wybór nauczyciela: Wybierz zestaw parametrów, który ma najmniejszą wartość funkcji celu jako zestaw nauczycielski.
4. Aktualizacja uczniów: Dla każdego zestawu parametrów (ucznia) zaktualizuj parametry na podstawie parametrów nauczyciela:

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + r \cdot (\vec{x}_{\text{teacher}}(t) - \vec{x}_i(t)), \quad (4.37)$$

gdzie r jest losowym współczynnikiem skalującym.

5. Sprawdzenie warunków końcowych: Jeśli spełniony jest warunek końcowy, zakończ algorytm. W przeciwnym razie przejdź do kroku 2.

Metoda TLBO posiada następujące właściwości:

- Globalna optymalizacja: Przy odpowiednio dobranych parametrach algorytm jest zdolny do znalezienia globalnego ekstremum funkcji celu.
- Prostota implementacji: Algorytm TLBO jest stosunkowo prosty do zrozumienia i zaimplementowania.
- Skalowalność: Może być stosowany do różnych typów problemów optymalizacyjnych, w tym wielowymiarowych.

Algorytm ewolucyjny (Evolutionary Algorithm - EA) [69, 111, 147] opiera się na zmienności populacji i ich genetyce, zwłaszcza strukturze, takiej jak geny, chromosomy, allele oraz mechanizmach, takich jak mutacja i rekombinacja. W niniejszej części przedstawiono założenia, opis algorytmu i właściwości metody EA.

Algorytm ewolucyjny (EA) jest metaheurystyczną techniką optymalizacji inspirowaną procesami ewolucyjnymi w naturze. Opiera się na populacji potencjalnych rozwiązań (jednostek), które ewoluują z pokolenia na pokolenie, dążąc do znalezienia globalnego ekstremum funkcji celu.

Algorytmy ewolucyjne opierają się na kilku kluczowych założeniach:

- Populacja: Zbiór wszystkich możliwych rozwiązań, z których każde jest reprezentowane przez zestaw zmiennych (genotyp).
- Funkcja celu: $f(\vec{x})$, którą chcemy zoptymalizować.
- Genotyp: Reprezentacja jednostki w formie zmiennych decyzyjnych.
- Mechanizmy ewolucyjne: Mutacja, rekombinacja, selekcja.

Algorytm ewolucyjny składa się z następujących kroków:

1. Inicjalizacja: Wygeneruj początkową populację $P(0)$ o rozmiarze N , gdzie każda jednostka \vec{x}_i jest losowo inicjalizowana.
2. Ocena: Oblicz wartość funkcji celu $f(\vec{x}_i)$ dla każdej jednostki \vec{x}_i w populacji.
3. Selekcja: Wybierz jednostki z populacji do stworzenia nowej populacji na podstawie ich wartości funkcji celu. Jednym z popularnych schematów selekcji jest selekcja turniejowa.
4. Rekombinacja (krzyżowanie): Wybierz pary jednostek (rodziców) i utwórz nowe jednostki (dzieci) poprzez wymianę części ich genotypów:

$$\vec{x}_i^{\text{child}} = \alpha \vec{x}_i^{\text{parent1}} + (1 - \alpha) \vec{x}_i^{\text{parent2}}, \quad (4.38)$$

gdzie α jest losowym współczynnikiem skalującym w zakresie $[0, 1]$.

5. Mutacja: Wprowadź losowe zmiany do genotypu jednostek z pewnym prawdopodobieństwem:

$$\vec{x}_i^{\text{mut}} = \vec{x}_i + \vec{\delta}, \quad (4.39)$$

gdzie $\vec{\delta}$ jest wektorem losowych wartości.

6. Zastąpienie: Utwórz nową populację $P(t + 1)$ z nowo utworzonych dzieci oraz wybranych jednostek ze starej populacji.
7. Sprawdzenie warunków końcowych: Jeśli spełniony jest warunek stopu (np. osiągnięcie maksymalnej liczby iteracji lub brak poprawy), zakończ algorytm. W przeciwnym razie przejdź do kroku 2.

Algorytmy ewolucyjne posiadają następujące właściwości:

- Globalna optymalizacja: Zdolność do znajdowania globalnych ekstremów w złożonych przestrzeniach poszukiwań.
- Różnorodność rozwiązań: Utrzymywanie różnorodności w populacji zmniejsza ryzyko utknięcia w ekstremach lokalnych.
- Adaptacyjność: Możliwość dostosowania mechanizmów ewolucyjnych do specyfiki problemu.

Optymalizacja roju (Particle-Swarm Optimization - PSO) [45, 104, 120] jest częścią dziedziny inteligencji zbiorowej i inteligencji roju. Algorytm naśladuje zachowanie zwierząt żyjących w roju, takich jak ptaki czy ryby, które nie polegają tylko na wiedzy indywidualnej, ale także na wiedzy roju. W niniejszej pracy przedstawiono założenia, opis algorytmu i właściwości metody PSO, z uwzględnieniem wzorów matematycznych. W PSO populacja potencjalnych rozwiązań, zwanych cząstkami, porusza się w przestrzeni poszukiwań, dążąc do znalezienia globalnego ekstremum funkcji celu poprzez wykorzystanie zarówno indywidualnych doświadczeń, jak i kolektywnej wiedzy roju.

Optymalizacja roju opiera się na kilku kluczowych założeniach:

- Populacja: Zbiór cząstek, z których każda reprezentuje potencjalne rozwiązanie.
- Funkcja celu: $f(\vec{x})$, którą chcemy zoptymalizować.
- Prędkość: Każda cząstka posiada prędkość \vec{v}_i , która określa jej ruch w przestrzeni poszukiwań.
- Pozycja: Każda cząstka posiada pozycję \vec{x}_i , która reprezentuje jej aktualne rozwiązanie.

- Parametry: Parametry algorytmu, takie jak wagi bezwładności, współczynniki przyciągania do najlepszego lokalnego i globalnego rozwiązania.

Algorytm PSO składa się z następujących kroków:

1. Inicjalizacja: Wygeneruj początkową populację cząstek $\vec{x}_i(0)$ o rozmiarze N , gdzie każda cząstka jest losowo inicjalizowana w przestrzeni poszukiwań, a jej prędkość $\vec{v}_i(0)$ jest losowo ustalana.
2. Ocena: Oblicz wartość funkcji celu $f(\vec{x}_i)$ dla każdej cząstki \vec{x}_i w populacji.
3. Aktualizacja najlepszych wyników: Zaktualizuj najlepsze lokalne \vec{p}_i oraz najlepsze globalne \vec{g} rozwiązania na podstawie wartości funkcji celu:

$$\vec{p}_i(t) = \begin{cases} \vec{x}_i(t), & \text{jeśli } f(\vec{x}_i(t)) < f(\vec{p}_i(t)) \\ \vec{p}_i(t), & \text{w przeciwnym razie} \end{cases}, \quad (4.40)$$

$$\vec{g}(t) = \arg \min_{\vec{p}_i(t)} f(\vec{p}_i(t)). \quad (4.41)$$

4. Aktualizacja prędkości i pozycji: Dla każdej cząstki zaktualizuj prędkość i pozycję według wzorów:

$$\vec{v}_i(t+1) = w\vec{v}_i(t) + c_1r_1(\vec{p}_i(t) - \vec{x}_i(t)) + c_2r_2(\vec{g}(t) - \vec{x}_i(t)), \quad (4.42)$$

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1), \quad (4.43)$$

gdzie w jest współczynnikiem bezwładności, c_1 i c_2 są współczynnikami przyciągania, a r_1 i r_2 są losowymi liczbami z przedziału $[0, 1]$.

5. Sprawdzenie warunków końcowych: Jeśli spełniony jest warunek stopu (np. osiągnięcie maksymalnej liczby iteracji lub brak poprawy), zakończ algorytm. W przeciwnym razie przejdź do kroku 2.

Algorytmy PSO posiadają następujące właściwości:

- Prostota implementacji: Algorytm PSO jest stosunkowo prosty do zrozumienia i implementacji.
- Szybka konwergencja: Dzięki mechanizmom przyciągania do najlepszych rozwiązań, algorytm szybko zbliża się do optymalnych wyników.

- Różnorodność rozwiązań: PSO utrzymuje różnorodność w populacji, co zmniejsza ryzyko utknięcia w ekstremach lokalnych.

Algorytm selekcji klonalnej (Clonal Selection Algorithm - CSA) [24,95,149] wpisuje się w dziedzinę Sztucznego Układu Odpornościowego (Artificial Immune Systems). Opiera się on na koncepcji działania systemu immunologicznego. Kiedy w organizmie pojawia się potencjalnie niebezpieczny antygen (funkcja celu), limfocyty (początkowe rozwiązania) są uwalniane do walki z nim. Komórki pamięci B zapamiętują najskuteczniejszą odpowiedź immunologiczną (najlepszy zestaw rozwiązań) i replikują ją. Podczas replikacji i wzrostu, nowy antygen ma hipermutację, która zmienia jego genom (wartość parametrów). W CSA populacja potencjalnych rozwiązań (limfocytów) ewoluuje poprzez proces selekcji, klonowania i mutacji, dążąc do znalezienia globalnego ekstremum funkcji celu.

Algorytm selekcji klonalnej opiera się na kilku kluczowych założeniach:

- Populacja: Zbiór limfocytów, z których każdy reprezentuje potencjalne rozwiązanie.
- Funkcja celu: $f(\vec{x})$, którą chcemy zoptymalizować.
- Selekcja: Wybór najskuteczniejszych limfocytów na podstawie ich powinowactwa do antygeny.
- Klonowanie: Tworzenie kopii wybranych limfocytów proporcjonalnie do ich powinowactwa.
- Mutacja: Wprowadzenie zmian do klonów w celu zwiększenia różnorodności.
- Komórki pamięci: Przechowywanie najlepszych rozwiązań w celu przyszłego wykorzystania.

Algorytm CSA składa się z następujących kroków:

1. Inicjalizacja: Wygeneruj początkową populację limfocytów $\vec{x}_i(0)$ o rozmiarze N .
2. Ocena: Oblicz wartość funkcji celu $f(\vec{x}_i)$ dla każdego limfocytu \vec{x}_i w populacji.
3. Selekcja: Wybierz N_s najlepszych limfocytów \vec{x}_i na podstawie ich wartości funkcji celu.

4. Klonowanie: Dla każdego wybranego limfocytu \vec{x}_i stwórz n_i klonów, gdzie n_i jest proporcjonalne do jego powinowactwa $1/f(\vec{x}_i)$:

$$n_i = \left\lfloor \beta \cdot \frac{1}{f(\vec{x}_i)} \right\rfloor, \quad (4.44)$$

gdzie β jest stałą skalującą.

5. Mutacja: Wprowadź mutacje do każdego kлона $\vec{x}_i^{(k)}$:

$$\vec{x}_i^{(k)} = \vec{x}_i + \vec{\delta}_i^{(k)}, \quad (4.45)$$

gdzie $\vec{\delta}_i^{(k)}$ jest wektorem losowych wartości, proporcjonalnym do odwrotności funkcji celu $1/f(\vec{x}_i)$.

6. Ocena klonów: Oblicz wartość funkcji celu $f(\vec{x}_i^{(k)})$ dla każdego kлона.
7. Selekcja klonów: Wybierz najlepsze klony i zastąp nimi najgorsze limfocyty w populacji.
8. Aktualizacja komórek pamięci: Zaktualizuj komórki pamięci najlepszymi rozwiązaniami.
9. Sprawdzenie warunków końcowych: Jeśli spełniony jest warunek stopu (np. osiągnięcie maksymalnej liczby iteracji lub brak poprawy), zakończ algorytm. W przeciwnym razie przejdź do kroku 2.

Algorytmy CSA posiadają następujące właściwości:

- Globalna optymalizacja: Zdolność do znajdowania globalnych ekstremów w złożonych przestrzeniach poszukiwań.
- Różnorodność rozwiązań: Mechanizmy klonowania i mutacji utrzymują różnorodność w populacji, zmniejszając ryzyko utknięcia w ekstremach lokalnych.
- Pamięć: Zdolność do przechowywania najlepszych rozwiązań w komórkach pamięci, co przyspiesza konwergencję.

Algorytm memetyczny (Memetic Algorithm - MA) [63, 68, 86] to połączenie metod wyszukiwania globalnego i lokalnego. Ideą MA jest integracja obu podejść w celu

uzyskania lepszych wyników optymalizacji. Takie podejście umożliwia zarówno eksplorację przestrzeni poszukiwań, jak i eksploatację lokalnych ekstremów, co może prowadzić do znalezienia optymalnych rozwiązań.

Algorytm memetyczny opiera się na kilku kluczowych założeniach:

- Populacja: Zbiór potencjalnych rozwiązań (osobników).
- Funkcja celu: $f(\vec{x})$, którą chcemy zoptymalizować.
- Algorytm globalny: Proces generowania nowych rozwiązań na szeroką skalę.
- Algorytm lokalny: Proces optymalizacji w ograniczonym obszarze wokół danego rozwiązania.
- Kryteria stopu: Warunki zakończenia algorytmu, np. maksymalna liczba iteracji lub brak poprawy.

Algorytm MA składa się z następujących kroków:

1. Inicjalizacja: Wygeneruj początkową populację $\vec{x}_i(0)$ o rozmiarze N , gdzie każde rozwiązanie jest losowo inicjalizowane.
2. Ocena: Oblicz wartość funkcji celu $f(\vec{x}_i)$ dla każdego rozwiązania \vec{x}_i w populacji.
3. Algorytm globalny: Zastosuj algorytm ewolucyjny (np. algorytm genetyczny) do wygenerowania nowych rozwiązań. Obejmuje to kroki takie jak selekcja, krzyżowanie i mutacja:

$$\vec{x}_i(t+1) = \text{Krzyżowanie}(\vec{x}_j(t), \vec{x}_k(t)) + \text{Mutacja}(\vec{x}_i(t)), \quad (4.46)$$

gdzie \vec{x}_j i \vec{x}_k są wybranymi rodzicami, a \vec{x}_i jest nowym rozwiązaniem.

4. Algorytm lokalny: Dla każdego nowego rozwiązania \vec{x}_i , przeprowadź lokalną optymalizację w celu poprawy wyniku:

$$\vec{x}_i^* = \text{LokalnaOptymalizacja}(\vec{x}_i). \quad (4.47)$$

5. Ocena: Oblicz wartość funkcji celu $f(\vec{x}_i^*)$ dla każdego zoptymalizowanego lokalnie rozwiązania.

6. Aktualizacja populacji: Zastąp najgorsze rozwiązania w populacji najlepszymi nowymi rozwiązaniami.
7. Sprawdzenie warunków końcowych: Jeśli spełniony jest warunek stopu (np. osiągnięcie maksymalnej liczby iteracji lub brak poprawy), zakończ algorytm. W przeciwnym razie przejdź do kroku 2.

Algorytmy MA posiadają następujące właściwości:

- **Efektywność:** Połączenie globalnego i lokalnego wyszukiwania prowadzi do efektywniejszego przeszukiwania przestrzeni rozwiązań.
- **Zdolność do unikania ekstremów lokalnych:** Algorytmy globalne pozwalają na przeskakiwanie między ekstremami lokalnymi, podczas gdy algorytmy lokalne dopracowują rozwiązania.
- **Różnorodność rozwiązań:** Utrzymanie różnorodności w populacji zmniejsza ryzyko przedwczesnej konwergencji.

Rozdział 5

Modele obliczeniowe

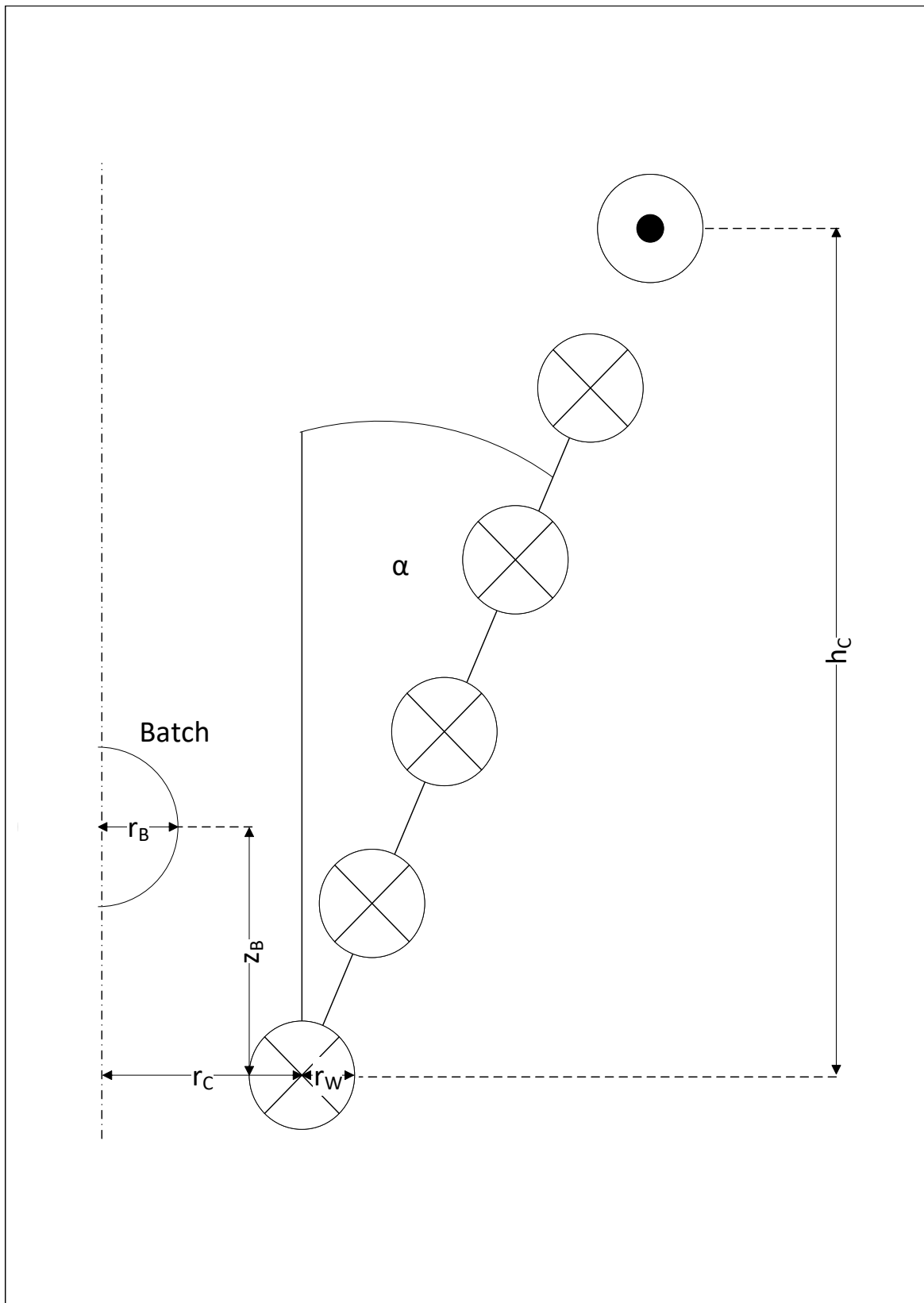
5.1 Wybór geometrii wzbudnika

Parametry początkowe są istotne dla każdego procesu, który będzie w jakikolwiek sposób optymalizowany. Może być on istotny do tego stopnia, że niewłaściwy wybór warunków początkowych może doprowadzić do pozostania przy rozwiązaniu suboptymalnym zamiast optymalnym.

Drugim aspektem jest wiarygodność modelu, który odwzorowuje dany proces. Nawet najlepiej przeprowadzona optymalizacja jest bezpodstawna jeżeli przyjęte założenia są błędne. Z tego powodu badacze postanowili odwzorować geometrię wzbudnika, który jest dla nich dostępny 5.1. Pozwala to na zestawienie wyników symulacji z rezultatami eksperymentów i potwierdzenie, że przyjęty model odpowiada rzeczywistości. Przekrój modelu 3D rozpatrywanego w pracy przedstawiono na rys.5.2.



Rysunek 5.1: Przykładowa funkcja celu w zadanych granicach z zaznaczonym na zielono rozwiązaniem optymalnym i zaznaczonym na czerwono przykładowym rozwiązaniem suboptymalnym.



Rysunek 5.2: Przekrój wzbudnika.

Wzbudnik składa się 4 zwojów i pojedynczego przewinięcia w kierunku przeciwnym. Wymiary geometryczne modelu przedstawiają się następująco:

- całkowita wysokość wzbudnika (h_C) - 0,06 m
- promień przekroju przewodu, z którego jest nawinięty wzbudnik (r_W) - 0,0015 m,
- wertykalna odległość pomiędzy zwojami - 0,002 m
- promień wsadu (r_B) - 0,0025 m,
- dolny promień wzbudnika (r_C) - 0,01 m,

Wraz z przedstawianiem kolejnych wersji modelu i postępowaniem badań ich geometria będzie ulegać zmianom. Zostanie to odpowiednio oznaczone we właściwych miejscach.

5.2 Model EM

5.2.1 Oprogramowanie i platforma sprzętowa

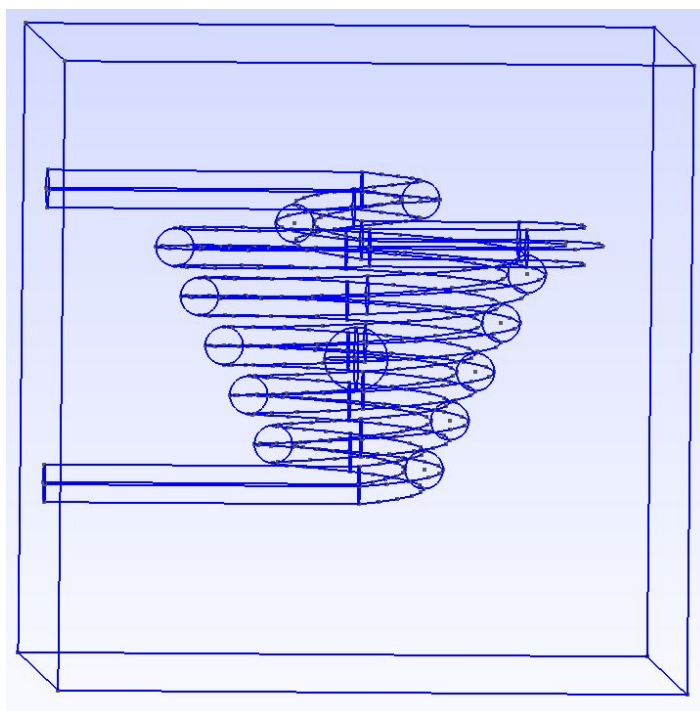
W związku z relatywnie wysokim kosztem przygotowania wielu fizycznych wersji wzbudnika, do zmiany parametrów prądu i geometrii wzbudnika zostało użyte modelowanie numeryczne i symulacja pola elektromagnetycznego z wykorzystaniem symulacji komputerowej. Jest to popularne podejście do prototypownia rozwiązań [117]. Istnieje duża różnorodność oprogramowania do obliczania modelu FEM. Istnieją produkty komercyjne takie jak Ansys, Flux, Comsol czy Solidworks, ale są też rozwiązania open-source takie jak gmsh z GetDP, GetFem++ czy Agros z Artapem [56] [89].

Ze względu na wcześniejsze doświadczenia badaczy, geometria została zaimplementowana w programie gmsh. Jest to trójwymiarowy generator siatki elementów skończonych zawierający trzy główne moduły: geometrię, siatkę i postprocessing. Gmsh jest dystrybuowany na warunkach GNU General Public License [47]. W celu symulacji omawianego procesu topienia metali wybrano program GetDP, który jest solverem FEM [33]. Do przeprowadzenia obliczeń wielowariantowych wykorzystano skrypt python, który generował geometrie modelu w języku gmsh oraz przetwarzał wyniki symulacji.

Symulacje obliczane były na serwerze wyposażonym w 2 procesory Intel Xeon 2,40 GHz oraz 40 GB pamięci RAM. Łącznie przeprowadzono 245 symulacji, które zajęły około 400 godzin obliczeń.

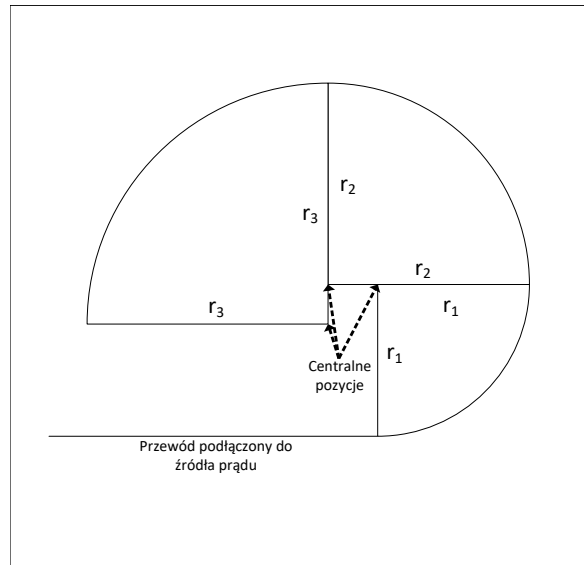
5.2.2 Geometria

Model został zaimplementowany w przestrzeni trójwymiarowej. W programie gmsh nie są dostępne wysokopoziomowe narzędzia dedykowane do rysowania rozszerzającej się spirali. Dlatego geometria wzbudnika została zaprojektowana na podstawie opisu równaniami analitycznymi. Przewód prowadzony od źródła zasilania opiera się na linii prostej (rysunek 5.3). Za nią rozpoczyna się zwijanie przewodu, a każdy pełny obrót przewodu został podzielony na 4 części. Wszystkie one oparte są na funkcjach okręgu o różnym położeniu środka i rosnącym promieniu. Koncepcja ta została przedstawiona na rysunku 5.4. Przed ostatnim zakretem następuje zmiana kierunku zwijania. Po niej przewód jest połączony z powrotem do źródła zasilania linią prostą (rysunek 5.3).



Rysunek 5.3: Zamodelowana geometria wzbudnika.

W ramach tego modelu zdecydowano się na geometrie, która jest zarówno trójwymiarowa, jak i asymetryczna. Mimo że czas symulacji takiego modelu jest dość znaczny



Rysunek 5.4: Schemat wyznaczenia geometrii kolejnych zawinięć wzbudnika.

(około 1 do 1,5 h) daje on bardziej wiarygodne wyniki w porównaniu do symetrycznego modelu 2D.

Do eksperymentu obliczeniowego przyjęto klasyczny model stożkowego wzbudnika do topienia lewitacyjnego. Kształt wzbudnika oparty jest na rzeczywistym wzbudniku stąd brak w nim symetrii. Ponadto geometria wzbudnika pozwala na połączenie z dostępnym dla badaczy źródłem zasilania, co jest istotne ze względu na przyszłą walidację.

5.2.3 Warunki początkowe

Do modelu zostały przypisane następujące parametry:

- wzbudnik jest wykonany z miedzi,
- wsad jest wykonany z aluminium,
- przewodność elektryczna miedzi - $6E7$ S/m,
- przewodność elektryczna aluminium - $3E7$ S/m,

Przyjęto wsad wykonany z aluminium, ze względu na niską temperaturę topienia i małą masę. Jest ono odpowiednie do analizy wielowariantowej systemu lewitacji elek-

tromagnetycznej, ponieważ łatwiej jest osiągnąć zarówno lewitację jak i topienie. Jest to również powszechna praktyka wykazana w innych badaniach [103].

5.2.4 Warunki brzegowe

Jak pokazano na rys. 5.3, przyjęto otoczenie w kształcie prostopadłościanu. Jego krawędzie są dwa razy dłuższe od wysokości wzbudnika Co daje wysokość 0,12 m.

Na powierzchniach otoczenia zostały ustalone warunki brzegowe modelu opisujące zanikanie pola EM na granicy obszaru obliczeniowego. Na obszarach będących końcami wzbudnika przyłożono jednorodnie rozłożony prąd o natężeniu 100 A. Natężenie dla obydwóch przyłączy wzbudnika miało przeciwny zwrot. Z kolei na pozostałych powierzchniach prostopadłościanu ustawiono granice naturalne, co oznacza, że pole magnetyczne było równoległe do omawianej granicy.

5.2.5 Jakość dyskretyzacji

Odległość pomiędzy sąsiednimi węzłami metody elementów skończonych (FEM) zależy od głębokości wnikania pola elektromagnetycznego opisanego równaniem (4.8) w wybranym rodzaju materiału. Zastosowano tetraedryczny rozkład węzłów. Największe zagęszczenie węzłów zostało przyjęte dla aluminiowego wsadu i w zależności od częstotliwości prądu przyjmował wartość zgodnie z tabelą 5.1, natomiast dla miedzianego wzbudnika wykorzystano dziesięciokrotną wartość wnikania pola elektromagnetycznego.

Tabela 5.1: Długość krawędzi meshu wyrażona w metrach w zależności od materiału przypisanego do danego obszaru i częstotliwości prądu.

		f [Hz]			
		10000	50000	100000	300000
Materiał	σ [S/m]				
Cu	56000000	0,000673	0,000301	0,000213	0,000123
Al	34000000	0,00863	0,00386	0,00273	0,00158

5.3 Model EM-T

5.3.1 Założenia wstępne

Główną nowością przedstawionego modelu są relacje między wsadem a otaczającym go powietrzem. Ruchy powietrza są związane z konwekcją wywołaną przez nagrzewający się wsad. Co więcej, model jest asymetryczny, więc stosunkowo dokładnie reprezentuje dostępny wzбудnik. W modelowaniu uwzględniono także zmianę właściwości materiału wraz ze zmianami temperatury.

Mając na uwadze przyszłe optymalizacje, model symulacyjny musi zapewniać kompromis między rozsądnym zużyciem pamięci i czasu pracy komputera a akceptowalną dokładnością.

5.3.2 Oprogramowanie

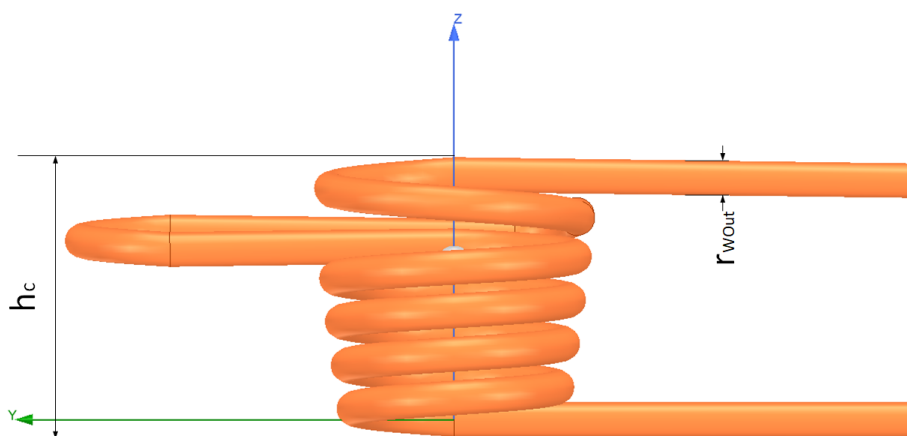
Ze względu na potrzebę modelowania sprzężonego pola EM-T z uwzględnieniem konwekcji zdecydowano się na zmianę oprogramowania i na tym etapie badań wykorzystano oprogramowanie z rodziny Ansys. W tym badaniu wykorzystano następujące moduły Ansys:

- *SpaceClaim* [4] to narzędzie do modelowania CAD, które zostało wykorzystane do przygotowania geometrii modelu. Obsługuje ono predefiniowaną geometrię opartą na równaniach matematycznych, takich jak helisa, co przyspiesza proces modelowania. Co więcej, istnieje również możliwość zapisywania modeli jako skryptów Python, co pozwoliło na bardziej precyzyjne i złożone modyfikacje geometrii.
- *Maxwell 3D* [1] to narzędzie pozwalające na symulację pracy maszyn elektrycznych. Interfejs Maxwell jest kompatybilny ze standardem modelowania ACIS. Obsługuje wspólny format CAD, w tym SpaceClaim. Maxwell obsługuje adaptacyjny generator siatki oparty na zdefiniowanym przez użytkownika poziomie zbieżności. Ponadto siatka może być również definiowana przez użytkownika. Maxwell 3D pozwolił obliczyć efekty prądów wirowych, przypisać wzbudzenie prądowe i napięciowe oraz warunki brzegowe (takie jak granice naturalne, zerowe styczne pole H , granice Neumanna i inne), przeprowadzić symulację parametryczną i wiele innych.

- *Icepak* [1] umożliwia symulację ogrzewania i chłodzenia urządzeń elektronicznych i energetycznych. Temperatura obiektu może być importowana z wyników symulacji innych produktów Ansys lub może być przypisana bezpośrednio. Podstawowym typem rozwiązania są obliczenia w stanie ustalonym i przejściowym. Obsługuje również zmiany temperatury poprzez konwekcję, promieniowanie i przewodzenie.
- *Fluent* [2] pozwala obliczyć przepływ powietrza, który miał być symulowany w konwekcji. Fluent ma specjalną wersję dla grup użytkowników o określonych potrzebach lub ograniczeniach. Symulacja Fluent może być połączona z innymi produktami.

5.3.3 Przepływ danych

Łącząc wiedzę na temat parametrów wzбудnika z dostępnym oprogramowaniem, przygotowano model symulacyjny. Pierwszym krokiem było odwzorowanie geometrii samego wzbudnika. Geometria modelu została przedstawiona na rys. 5.5. Model posiadał następujące cechy:



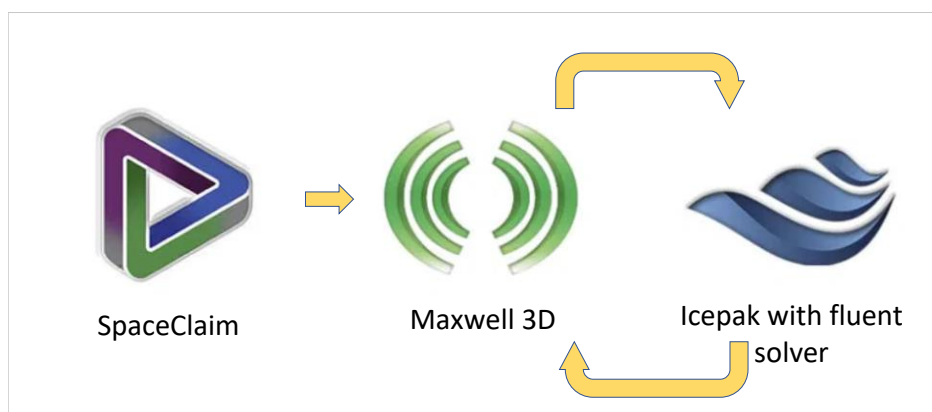
Rysunek 5.5: Model geometrii wzbudnika przygotowany w programie SpaceClaim dla wzbudnika, na którym wykonano pomiary.

- Wsad był kulą o promieniu 3 mm.
- Oś Z została ustawiona na środku wzbudnika.

- Wzbudnik w modelu miał dwa końce przewodu w kierunku Y, co odpowiadało przewodowi podłączonemu do źródła zasilania w fizycznym wzbudniku.
- W kierunku Y widoczne było odkształcenie drutu, co pozwoliło zmienić kierunek nawinięcia ostatniego drutu.
- W modelowanym wzbudniku odległości między obwodami pozostały takie same, natomiast w fizycznym wzbudniku były one nieco nieregularne.

Położenie wsadu zostało dobrane na podstawie analizy wartości siły elektrodynamicznej dla różnych pozycji wsadu. Maxwell 3D pobrał modelowaną geometrię ze SpaceClaim i obliczył siłę podnoszenia dla położenia wsadu na osi Z w zakresie od 10 do 40 mm. Obliczenia elektromagnetyczne zostały przeprowadzone dla wyższej z dwóch pozycji, w których siła grawitacji była równa sile wznoszącej. Dokładniejszy opis znajduje się w 8.1.3.

Użyte oprogramowanie zostało połączone w następujący sposób. Zamodelowano geometrię w SpaceClaim, a następnie przygotowano skrypt Python do jej wygenerowania. Konfiguracja elektromagnetyczna została dodana w programie Maxwell 3D. Na koniec moc czynna wyliczona w Maxwell 3D została zaimportowana do Icepak z podpiętym solverem Fluent co pozwoliło na wyliczenie zmian pola temperatury, które z kolei zostały przesłane z powrotem do Maxwella 3D i na ich podstawie były zmieniane właściwości elektryczne w zależności od rodzaju materiału. Podsumowując, przepływ danych między tymi produktami pokazano na rys. 5.6.

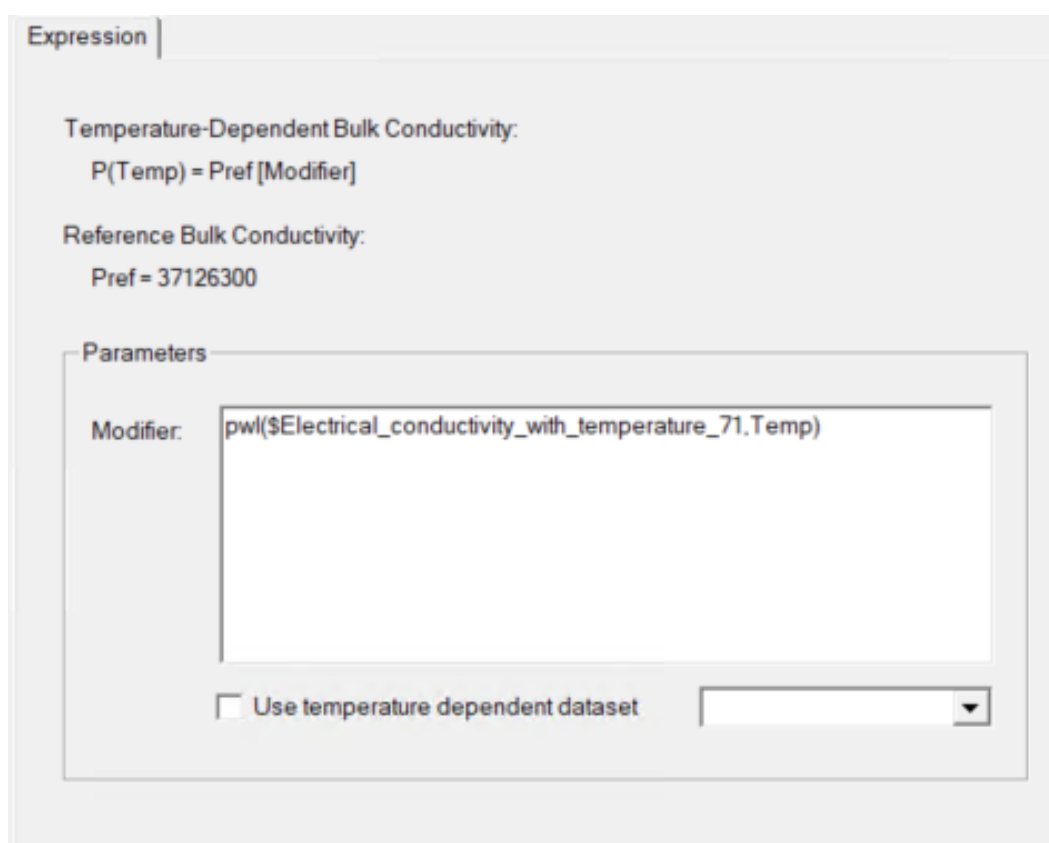


Rysunek 5.6: Przepływ danych między oprogramowaniem.

5.3.4 Analiza i warunki brzegowe pola elektromagnetycznego

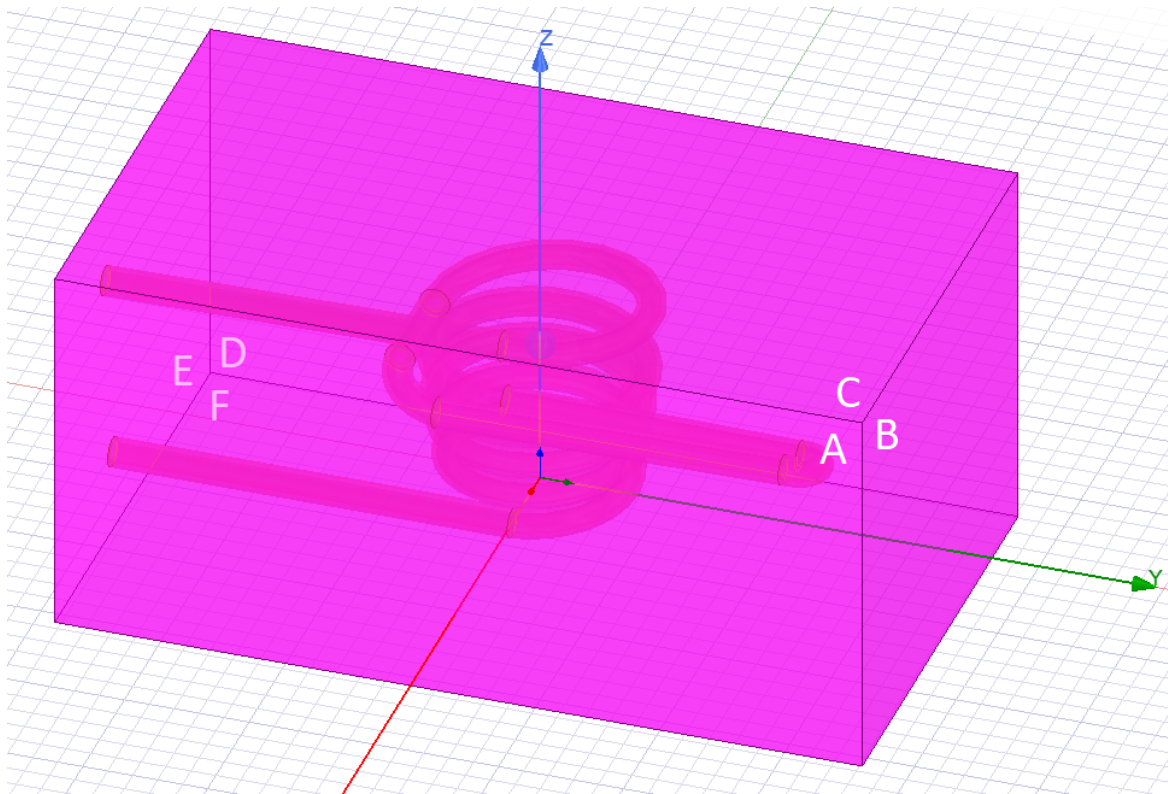
Jako typ rozwiązania dla modelu aktywowano indukowanie prądów wirowych dla wsadu i wzbudnika (4.1), (4.4), (4.6) i (4.2). Ustawiono typ obliczeń jako symboliczny. Użyto opisu pola elektromagnetycznego za pomocą magnetycznego potencjału wektorowego A i potencjału skalarnego V , używając opisów symbolicznych (4.1), (4.4), (4.6) i (4.2). Ustawiono temperaturę początkową na 22°C, zgodnie z temperaturą pomieszczenia (rys. 6.1) podczas pomiarów.

W przypadku wsadu wykonanego z aluminium przewodność elektryczna wynosiła 37126300 S/m i zmieniała się wraz z temperaturą zgodnie z zakodowanym równaniem materiału przedstawionym na rysunku 5.7. Przewodność elektryczna wzbudnika miedzianego została ustawiona na 58000000 S/m, a ze względu na aktywne chłodzenie wodą, modyfikator termiczny został wyłączony. Emisyjność ciała (ϵ) dla każdego rodzaju materiału były zgodne z danymi z biblioteki materiałów z Ansys w wersji 20.2.

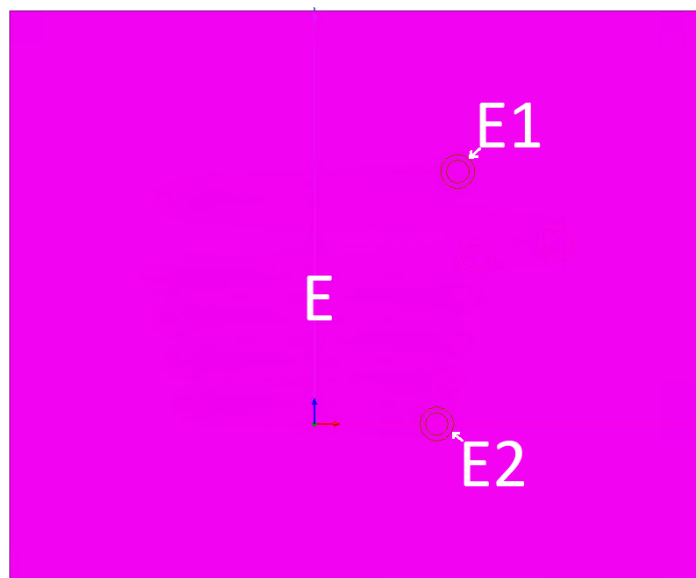


Rysunek 5.7: Modyfikator termiczny dla aluminium zdefiniowany w środowisku Ansys.

Otoczeniem podczas obliczeń było w kształcie prostopadłościanu i składało się z powietrza (rys. 5.8). Wymiary otoczenia wynosiły $150 \times 120 \times 80$ mm. Powierzchnie otoczenia miały warunki brzegowe ustawione jako granice naturalne, co oznacza, że pole magnetyczne było równoległe do granicy (4.7). Warunki brzegowe dla powierzchni E w miejscu, w którym dochodziły do nich końce wzbudnika (E1 i E2 zaznaczone na rysunku 5.9), były inne. W tym przypadku prąd o przeciwnym kierunku został przypisany do obu powierzchni styku. Przypisany prąd wynosił 340 A; jego częstotliwość to 277777 Hz.



Rysunek 5.8: Środowisko modelu elektromagnetycznego, w którym przeprowadzono obliczenia. Powierzchnie środowiska oznaczono kolorem amarantowym. Litery oznaczają powierzchnie środowiska, do których są przypisane warunki brzegowe. ABC oznaczone jaśniejszym kolorem opisują powierzchnie widoczne z danej perspektywy, natomiast DEF, do których użyto ciemniejszego odcienia oznaczają powierzchnie zakryte przez powierzchnie ABC.



Rysunek 5.9: Powierzchnia E środowiska, do którego są przypisane warunki brzegowe z zaznaczonymi przyłączeniami wzbudnika (E1 i E2).

Włączono siatkę adaptacyjną dla modelu i dodatkowo dla wsadu ustawiono warstwę o głębokości zgodnej z głębokością wnikania dla tego materiału i częstotliwości zgodnie z (4.8). Ponadto ustawiono gęstsza siatkę dla wzbudnika, aby zwiększyć liczbę elementów w przekroju przewodu.

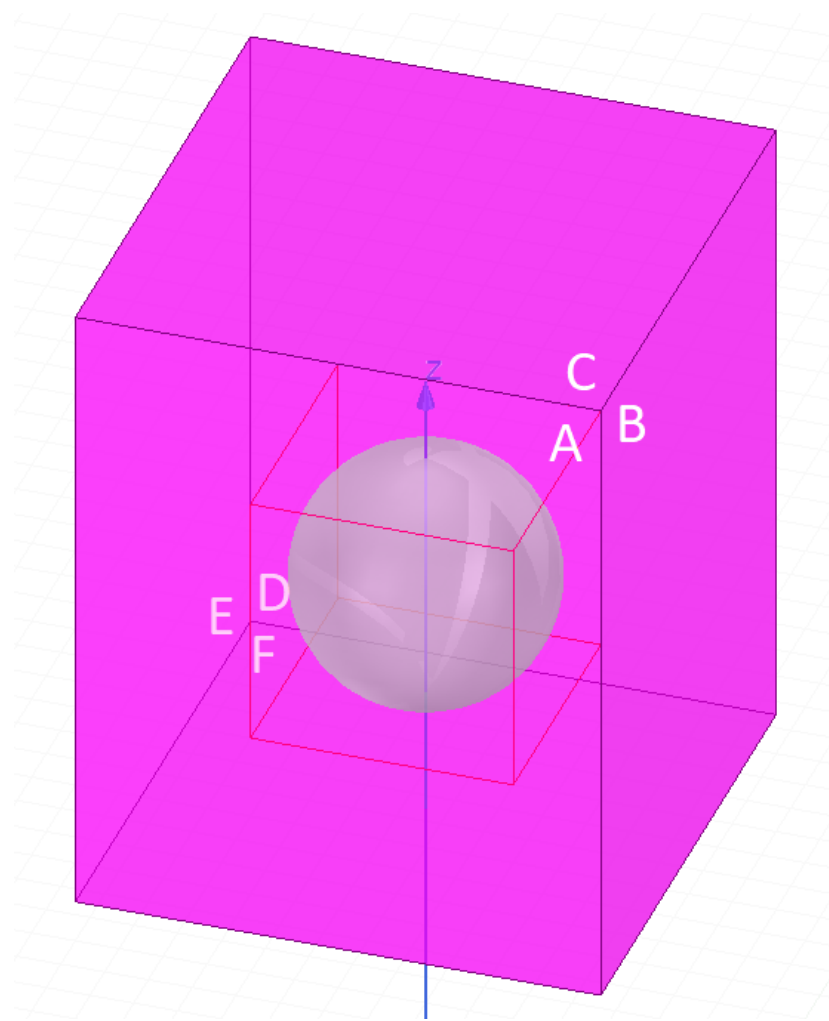
5.3.5 Analiza i warunki brzegowe pola termicznego

Na podstawie wyników obliczeń elektromagnetycznych przeprowadzono analizę termiczną (4.18). W tym celu dla modelu obliczeń cieplnych ustawiono następujące właściwości. Ze względu na aktywne chłodzenie wzbudnika, pominięto jego analizę pod kątem zmian temperatury. Pozwoliło to zmniejszyć złożoność modelu i analizować zmiany temperatury tylko we wsadzie i otaczającym go powietrzu. Ustawiono temperaturę początkową na 22°C , która była równa temperaturze dla obliczeń elektromagnetycznych.

Otoczenie wsadu (rys. 5.10) miało kształt prostopadłościanu o wymiarach $13 \times 13 \times 26$ mm. Przestrzeń na górze wsadu była dwa razy większa niż przestrzeń pod wsadem. Typem materiału w środowisku było powietrze. Ustawiono warunki brzegowe na powierzchniach otoczenia jako naturalne granice, co oznacza, że temperatura na zewnątrz prostopadłościanu była stała.

Jako źródła ciepła model importował gęstość objętościową mocy czynnej wydziel-

nej we wsadzie (4.4) i (4.5). Umożliwiono zmiany temperatury przez konwekcję i promieniowanie. Model promieniowania dyskretnych rzędnych (DO) rozwiązywał równanie transferu promieniowania (RTE) dla skończonej liczby dyskretnych kątów bryłowych, z których każdy był powiązany ze stałym kierunkiem wektora [3]. Promieniowanie ciepłe zostało przypisane do powierzchni wsadu. Aby odpowiednio dostosować przepływ konwekcyjny, ustawiono grawitację w kierunku Z. Włączono dwukierunkowe sprzężenie z częścią elektromagnetyczną.



Rysunek 5.10: Środowisko modelu ciepłoprzepływowego, w którym przeprowadzono obliczenia. Powierzchnie środowiska są oznaczone kolorem amarantowym. Litery oznaczają powierzchnie środowiska, do których są przypisane warunki brzegowe. ABC oznaczone jaśniejszym kolorem opisują powierzchnie widoczne z danej perspektywy. Natomiast DEF, do których użyto ciemniejszego odcienia, oznaczają powierzchnie zakryte przez powierzchnie ABC.

5.3.6 Dynamika płynów i warunki brzegowe dla przepływu powietrza

W przypadku analizy pola termicznego, otoczenie wsadu (rys. 5.10) miało kształt prostopadłościanu o wymiarach $13 \times 13 \times 26$ mm. Przestrzeń na górze wsadu była dwa razy większa niż przestrzeń pod wsadem. Wsad i wzbudnik był otoczony powietrzem. Ustawiono warunki brzegowe na powierzchniach otoczenia (rys. 5.10) jako otwarte, umożliwiając przepływ powietrza przez nie.

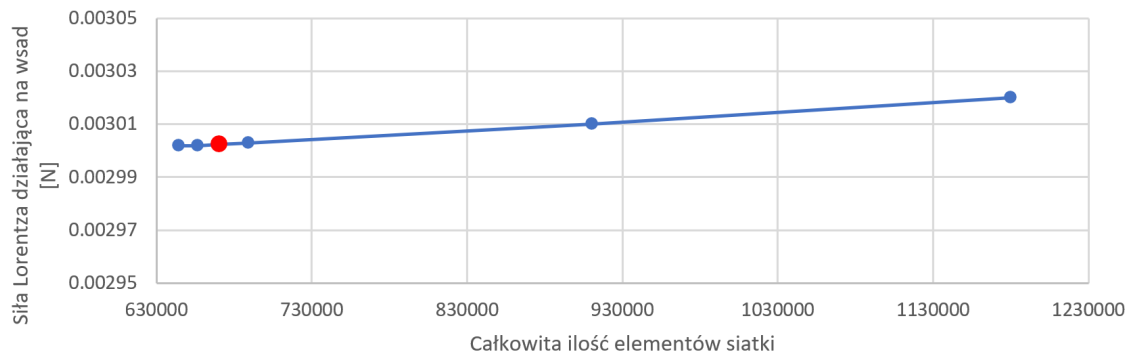
5.3.7 Jakość dyskretyzacji

Dokładność obliczeń symulacyjnych zależała od założeń przyjętych w celu uproszczenia modelu, ale w przypadku symulacji numerycznych dokładność zależy również od poprawności dyskretyzacji modelu.

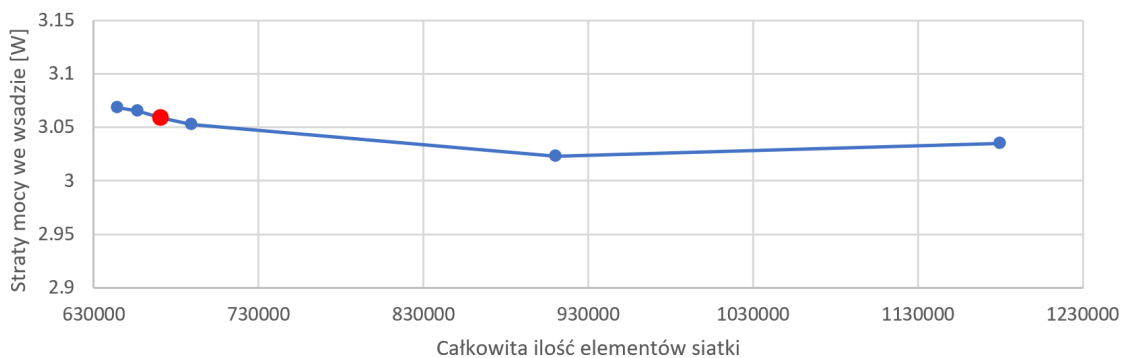
Oprogramowanie Maxwell zapewnia możliwość wyboru różnych strategii doboru siatki, należy jednak pamiętać, że początkowa siatka przygotowana przez użytkownika jest zwykle jednorodna i może składać się ze zbyt małej liczby elementów. Aby temu zapobiec, wprowadzono siatkę adaptacyjną, która przeprowadza analizę przed rozpoczęciem rzeczywistej symulacji. Użytkownik może określić minimalną liczbę zagęszczeń siatki, które należy wykonać, podczas gdy program szacuje błąd, jaki przyjęta siatka wprowadza do wyniku. W przypadku rozważanego modelu ustalono, że przed określeniem właściwej siatki muszą nastąpić co najmniej 2 zagęszczenia siatki. Ostatecznie przeprowadzono 3 zagęszczenia.

Niezależnie od wbudowanych mechanizmów programu, przeprowadzono analizę niezależności. Ponieważ celem modelu jest symulacja zmian temperatury wsadu w stanie lewitacji, analizę niezależności przeprowadzono dla dwóch wartości: siły elektrodynamicznej działającej na wsad (rys. 5.11) oraz mocy czynnej wydzielona we wsadzie (rys. 5.12). Gęstość siatki, dla której wykonano większość obliczeń, jest zaznaczona na czerwono na wykresach (rys. 5.11 i rys. 5.12). Na podstawie tej referencyjnej gęstości siatki przygotowano dwa kolejne modele o zmniejszonej gęstości siatki i trzy modele o zwiększonej gęstości siatki. Gęstość siatki została zwiększona w obszarze wsadu i wzbudnika jako obszarach najbardziej wrażliwych na takie zmiany ze względu na głębokość wnicania pola elektromagnetycznego. Użycie gęstszej siatki nie prowadzi do znacząco różnych wyników, ale powoduje większe wykorzystanie zasobów komputera, w tym wydłużenie czasu symulacji. Względne odchylenie między wynikami, przyjętymi jako poprawne,

a wynikami uzyskanymi dla najgęstszej siatki wynosi 0,79% dla mocy i 0,58% dla siły elektrodynamicznej, przy czym czas obliczeń wzrasta z 50 minut dla wybranego wariantu do 1 godziny 20 minut dla wariantu z najgęstszą siatką, wydłuża to więc czas dla pojedynczej symulacji o 60%. Zgodnie z tym stwierdzono, że jakość siatki była wystarczająca dla rozważanego problemu. Całkowita liczba elementów siatki wynosiła 670 603, a typ siatki był czworościenny.



Rysunek 5.11: Analiza wrażliwości siły elektrodynamicznej dla różnych gęstości siatki dyskretyzacyjnej. Czerwony punkt odpowiada gęstości siatki, dla której została przeprowadzona symulacja.

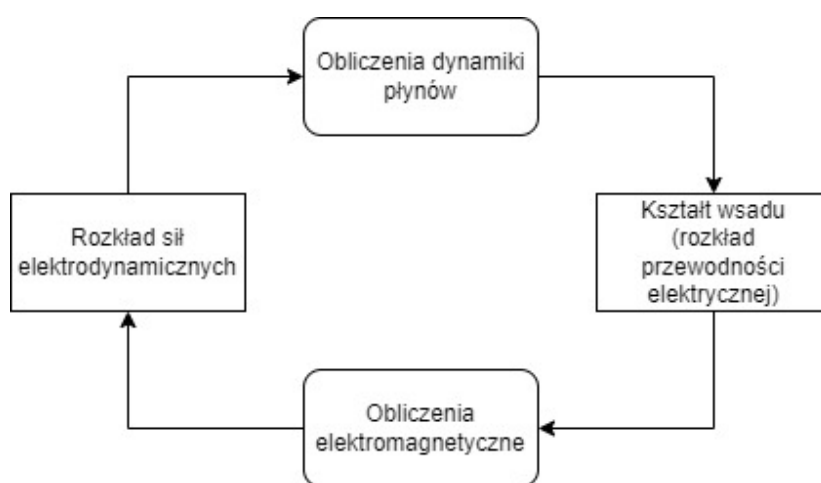


Rysunek 5.12: Analiza wrażliwości mocy czynnej wydzielonej dla wsadu dla różnych gęstości siatki dyskretyzacji. Czerwony punkt odpowiada gęstości siatki, dla której została przeprowadzona symulacja.

5.4 Model EM-T-FD

5.4.1 Założenia wstępne

Przedstawiony w tej sekcji model służy do wyznaczania geometrii wsadu po osiągnięciu temperatury topienia. Przyjmuje jako wyjściową do analizy eksperymentalnie wyznaczoną pozycję lewitacji wsadu po stopieniu 8.3. Do modelowania tego zjawiska została wykorzystana symulacja hydrodynamiczna, której schemat przedstawiono na rysunku 5.13.



Rysunek 5.13: Schemat cyklu symulacji geometrii stopionego wsadu.

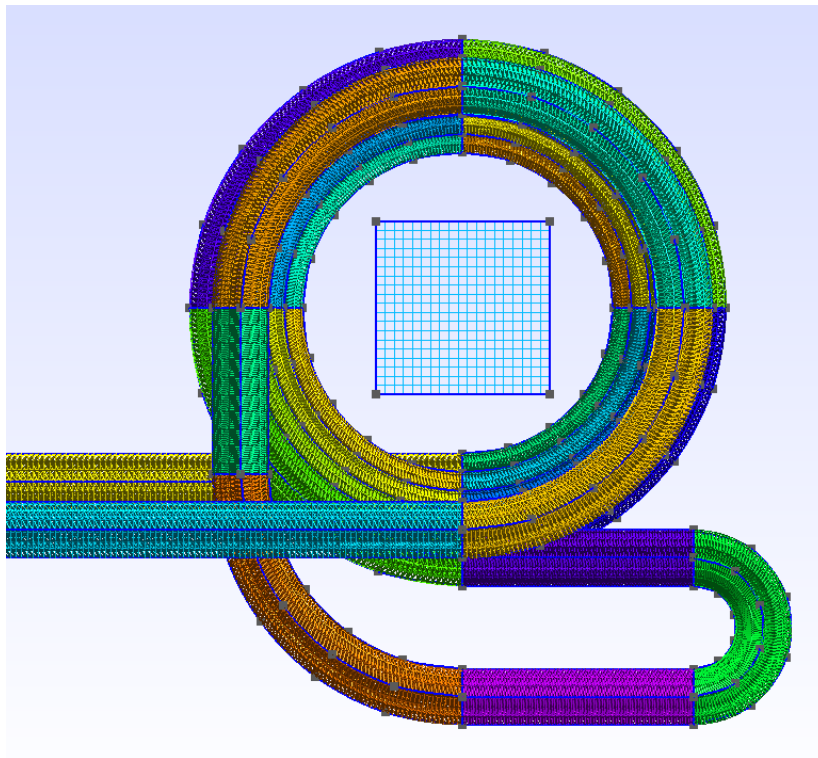
Całość rozpoczyna się od obliczeń na submodelu elektromagnetycznym, na podstawie których wyznaczane są siły elektrodynamiczne działające na ciekły wsad. Następnie te dane są przesyłane do submodelu dynamiki płynów, który ustala aktualny kształt cieczy. Cykl ten jest powtarzany, aż do osiągnięcia powtarzalnej geometrii wsadu. W celu zapewnienia odpowiedniego śledzenia granicy faz metal-powietrze przyjęto krok obliczeń wynoszący 0,01 s.

Biorąc pod uwagę, że obliczenia elektromagnetyczne połączone z dyskretyzacją modelu na elementy skończone są znacznie bardziej obciążające dla maszyny obliczeniowej niż wyznaczanie nowej geometrii w submodelu dynamiki płynów, zastosowano więc odpowiednie uproszczenia części elektromagnetycznej. Dla obliczeń elektromagnetycznych i hydrodynamicznych przyjęto stałą siatkę submodelu. W obszarze, w którym eksperymentalnie zaobserwowano lewitację stopionego wsadu, kształt stopionego wsadu jest odwzorowany poprzez przypisanie odpowiedniej przewodności elektrycznej. Pozwala to na zastosowanie wspólnych siatek dla obu submodelów w obszarze, w którym spodzie-

wamy się wystąpienia stopionego wsadu. Dla wyższych częstotliwości należy zastosować gęstsze siatki, co jest wymuszone przez zmniejszenie głębokości wnikania pola. Podejście to jest również stosowane przez innych badaczy [19, 20].

5.4.2 Submodele

W ramach prezentowanego modelu zastosowano dwa submodele: elektromagnetyczny i dynamiki płynów. Do obliczeń elektromagnetycznych wykorzystano model, który pod względem użycia oprogramowania, warunków początkowych i brzegowych jest zgodny z tym przedstawionym w sekcji 5.2. W miejscu, w którym eksperymentalnie potwierdzono lewitację płynnego wsadu, umieszczono sześcienny obszar, który został podzielony sześcienną siatką. Wersje submodelu elektromagnetycznego z rozrzedzoną (dla lepszej wizualizacji pomysłu) i ukrytą siatką powietrza przedstawiono na rysunku 5.14.



Rysunek 5.14: Przykładowa dyskretyzacja modelu. Podział otoczenia wzbudnika został ukryty ze względu na czytelność obrazu. Ostateczna siatka wsadu i jego otoczenia jest gęstsza i uzależniona od głębokości wnikania pola. Do wizualizacji siatka została rozrzedzona, żeby dobrze przedstawiała przyjętą koncepcję.

Drugi submodel zajmuje się obliczeniami związanymi z dynamiką płynów. Jednym z warunków początkowych submodelu FD jest gęstość sił elektrodynamicznych wyznaczona w submodelu analizy pola elektromagnetycznego. Przyjmuje on wartości sił oddziałujących na poszczególne węzły modelu i na ich podstawie wylicza nową geometrię wsadu. Model dynamiki płynów jest zaimplementowany w programie Fluent z rodziny oprogramowania Ansys. Opis produktu Fluent został już zaprezentowany w sekcji 5.3.2. Geometria submodelu obejmuje tylko przestrzeń, w której znajduje się wsad i jego bezpośrednie otoczenie, czyli obszar podlegający dyskretyzacji z użyciem heksahedronów. Jest to obszar, w którym potencjalnie może się znaleźć stopiony wsad. Wynikiem działania solvera związanego z dynamiką płynów jest nowa geometria wsadu.

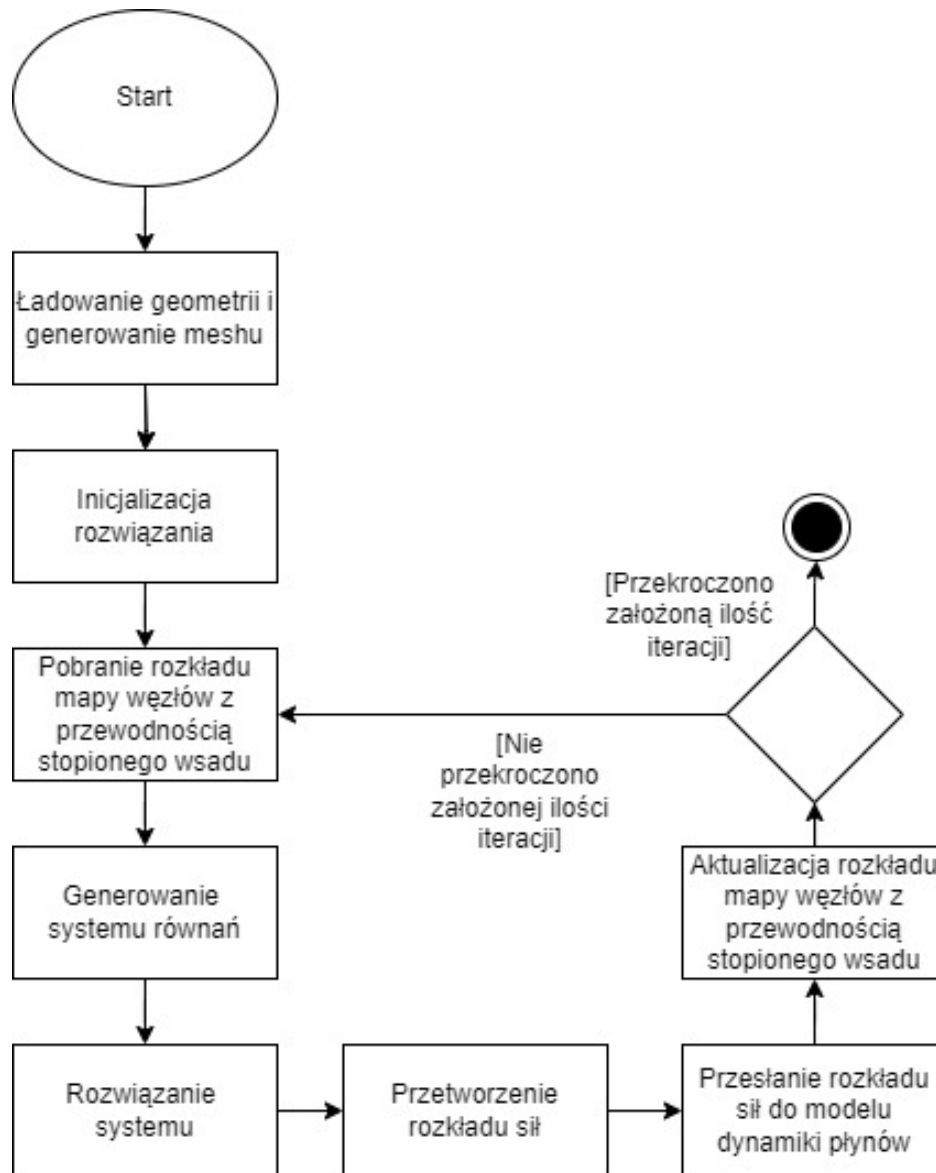
5.4.3 Przepływ danych

Na podstawie schematu cyklu symulacji geometrii stopionego wsadu, przedstawionego na rysunku 5.13 przygotowano algorytm opisujący współdziałanie obydwóch submodeli 5.15.

Na początku ładowana jest geometria modelu. Dokładna geometria będzie się różniła w zależności od wykonywanych badań, dlatego jest przedstawiana w rozdziałach wykorzystujących przedstawiany model. Obliczenia elektromagnetyczne opierają się na mapie przewodności, która jest pobierana z submodelu dynamiki płynów. Jednym z niewielu oprogramowań pozwalających na niejednorodny rozkład konduktywności jest GetDP [33]. Dodatkowo pozwala ono na ponowne użycie wyników poprzednich symulacji, co zmniejsza czas potrzebny do wykonywania obliczeń. W następnym kroku GetDP inicjalizuje model.

Dalej następuje import danych z produktu Fluent w postaci mapy węzłów z przypisaną przewodnością stopionego wsadu.

Później układ równań jest rozwiązywany iteracyjnie metodą Generalized Minimal Residual Method [100]. Na tej podstawie ustalany jest rozkład sił elektrodynamicznych, które są eksportowane do submodelu dynamiki płynów, gdzie z kolei aktualizowana jest geometria wsadu. Na końcu następuje powrót do obliczeń elektromagnetycznych.



Rysunek 5.15: Algorytm realizacji obliczeń z uwzględnieniem rzeczywistej geometrii stopionego wsadu.

Rozdział 6

Stanowisko pomiarowe i metodyka pomiarów

6.1 Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe (rysunek 6.1) została przygotowana jako kombinacja narzędzi wystarczających do pomiaru podstawowych parametrów charakteryzujących proces ETL. Zawierało ono następujące elementy:

- Kamery termowizyjną (na podczerwień) - PI 640 (oznaczona jako 1 na rysunku). Producentem była firma Optris, a miejscem produkcji Niemcy.
- Kamery wideo D5300 (oznaczoną jako 2 na rysunku 6.1). Producentem była firma Nikon, a miejscem produkcji Tajwan.
- Szklaną rurkę (oznaczoną numerem 3 na rysunku 6.1). Producent i miejsce produkcji nie są znane.
- Sondę prądową z przetwornikiem CWT 60xB (oznaczoną jako 4 na rysunku 6.1). Producentem była firma Powertek, a miejscem produkcji Wielka Brytania.
- Oscyloskop-THS720P Ręczny oscyloskop cyfrowy. Producentem była firma Tektronix, a miejscem produkcji USA.

Wymiary kamery termowizyjnej wynosiły $45 \times 56 \times 90$ mm, a jej waga nie przekraczała 400 g, dzięki czemu można ją było łatwo zamontować nad wzbudnikiem. Co



Rysunek 6.1: Stanowisko używane do pomiaru pozycji i temperatury wsadu oraz parametrów elektrycznych. Opis oznaczeń znajduje się w tekście.

ważne, zakres pomiaru temperatury (od 150 do 900 °C) był wystarczający do zarejestrowania topienia aluminium. Emisyjność kamery została ustawiona na 0,02, aby dopasować ją do emisyjności aluminium w stanie stałym [135]. Kamera termowizyjna rejestrowała wsad od góry. Z tej pozycji nie było żadnych przeszkód, a kamera znajdowała się w bezpiecznej odległości od źródła ciepła.

Kamera wideo posiada częstotliwość odświeżania od 24 do 60 klatek na sekundę, a efektywna liczba pikseli, wynosząca 24,2 miliona pikseli, była wystarczająca do zarejestrowania położenia i deformacji wsadu podczas topienia. Kamera znajdowała się z przodu wzbudnika zamontowanego na statywie. Kadr obejmował wzbudnik i linijkę, co umożliwiało skalowanie obrazu cyfrowego.

Rurka wykonana z odpornego na wysoką temperaturę przezroczystego szkła została umieszczona w środku wzbudnika, aby zapewnić oddzielenie przewodu wzbudnika od wsadu. Rurka jest otwarta od góry, dzięki czemu pole widzenia kamery termowizyjnej nie było zasłonięte.

Sonda napięciowa oscyloskopu była podłączona do końców wzbudnika i mierzyła napięcie bezpośrednio na cewce. Sonda prądowa, którą była cewka Rogowskiego z odpowiednim przetwornikiem, została przymocowana do wzbudnika. Sonda prądowa mierzyła prąd przepływający przez wzbudnik.

6.2 Metodyka pomiarów

Wsad jest wprowadzany do wzbudnika od góry za pomocą nici poliestrowej, która spala się w miejscu, w którym była połączona ze wsadem na początku procesu topienia; następnie nić zostaje wyciągnięta.

W ramach wykonywania pomiarów z wykorzystaniem stanowiska kontrolowano następujące wielkości: czas od wprowadzenia wsadu, do osiągnięcia temperatury topienia, pozycja stabilnej lewitacji wsadu podczas eksperymentu, odkształcenia wsadu po osiągnięciu temperatury topienia i parametry zasilania wzbudnika.

Poszczególne właściwości były kontrolowane w następujący sposób:

- Pomiar czasu topienia — Czas nagrzewania wsadu we wzbudniku jest obliczany na podstawie zapisów z kamer wideo i termowizyjnej. Połączono oba nagrania w jedną klatkę, jak pokazano na rys. 8.1. Na podstawie obrazu z kamery wideo określono czas, w którym wsad został wprowadzony do wzbudnika, natomiast na podstawie obrazu z kamery termowizyjnej określono moment uzyskania temperatury topienia wsadu.
- Pomiar stabilnej pozycji lewitacji wsadu — Jednym z podstawowych parametrów procesu jest miejsce, w którym wsad stabilnie lewituje. Podczas pomiarów

linijka widoczna na rys. 6.1 znajdowała się w tej samej odległości od kamery wideo, co lewitujący wsad. Została ona wykorzystana do oszacowania liczby pikseli na obrazie, która odpowiadała 1 mm w rzeczywistości. Wysokość lewitacji wsadu została zmierzona na podstawie obrazu cyfrowego o rozdzielczości 1920×1080 . Jeden milimetr odpowiadał dziewięciu pikselom na obrazie. Na tej podstawie określono odległość wsadu od dolnego zwoju. Odchylenie standardowe wynosiło 1 mm.

- Pomiar kształtu wsadu po osiągnięciu temperatury topienia — Kamera wideo nie kończyła nagrywać po osiągnięciu temperatury topienia, dzięki temu odkształcenia geometrii wsadu również były obserwowane. Kształt wsadu był utrwalany jako pojedyncza klatka wycięta z nagrania.
- Pomiarzy zasilania — Zasilania wzbudnika były odczytywane z ekranu oscyloskopu. Podczas pomiarów dokonywano odczytu podczas gdy wzbudnik znajdował się w stanie jałowym jak i po wprowadzeniu wsadu do wnętrza. Nie zaobserwowano jednak widocznych różnic pomiędzy tymi pomiarami. W ramach tej części pomiarów kontrolowano: częstotliwość, natężenie, napięcie i przesunięcie fazowe.

Rozdział 7

Wstępne badania EM

7.1 Opis problemu

Wystąpienie zjawiska lewitacji elektromagnetycznej i grzania wsadu zależy zarówno od geometrii wzbudnika, wielkości i parametrów wsadu, jak i parametrów elektrycznych. Został wykonany eksperyment obliczeniowy mający na celu obliczenie sił wznośzących w zależności od zmiany geometrii wzbudnika przy jednoczesnej kontroli mocy czynnej indukowanej we wsadzie i wzbudniku, co z kolei pozwala na obliczenie sprawności energetycznej procesu. W ramach badań przedstawionych w tym rozdziale został wykorzystany model przedstawiony w sekcji 5.2.

Celem badań przedstawionych w tym rozdziale jest przegląd wpływu wybranych parametrów geometrycznych i prądowych, w poszukiwaniu zestawień, w których występuje lewitacja wsadu. Uzyskane rozwiązania są oceniane pod kątem sprawności energetycznej topienia. W tym kontekście: geometria wzbudnika, częstotliwość prądu i położenie wsadu, są traktowane jako zmienne, natomiast pozostałe wymiary wzbudnika pozostają stałe. Parametry o stałych wartościach zostały przedstawione w sekcji 5.2.

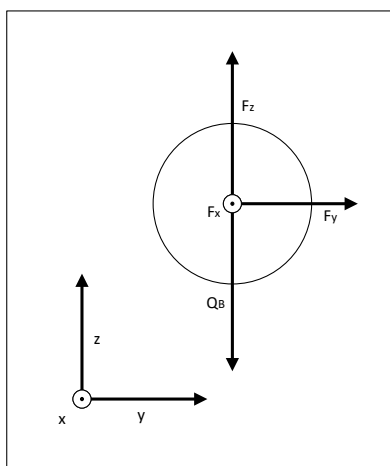
Uzyskane wyniki dają cenny wgląd w kształt funkcji celu (sprawności energetycznej), co może być pomocne dla osób chcących kontynuować przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań. Pozwalają również na zgrubne sformułowanie ograniczeń nakładanych na wartości parametrów spełniających warunek lewitacji. Ostatecznie, analiza najlepszego wyniku może stanowić punkt odniesienia dla przyszłych obliczeń.

Te parametry, które zmieniają się podczas eksperymentu, przyjmują następujące wartości:

- pozycja wsadu (z_B) (rys. 5.2) będzie należeć do zbioru $\{0,01, 0,015, 0,02, 0,025, 0,03, 0,035, 0,04\}$ m mierząc od dołu wzbudnika,
- połowa kąta stożkowego (α) (rys. 5.2) należy do zbioru $\{ \frac{6\Pi}{32}, \frac{5\Pi}{32}, \frac{4\Pi}{32}, \frac{3\Pi}{32}, \frac{2\Pi}{32} \}$,
- częstotliwość prądu (f) należy do zbioru $\{5, 10, 15, 20, 25, 30, 35\}$ kHz.

Model obliczeniowy, do którego zostały zaimplementowane wymienione parametry geometryczne i prądowe, został opisany w sekcji 5.2.

Podczas eksperymentu kontrolowano następujące parametry: siłę wznoszącą (F_z), całkowitą moc dostarczaną do układu P_T , moc rozpraszaną we wsadzie P_B , co pozwala oszacować sprawność procesu 3.1, oraz pozostałe siły działające na wsad. Nazwy osi i sił działających na wsad przedstawiono na rys. 7.1.

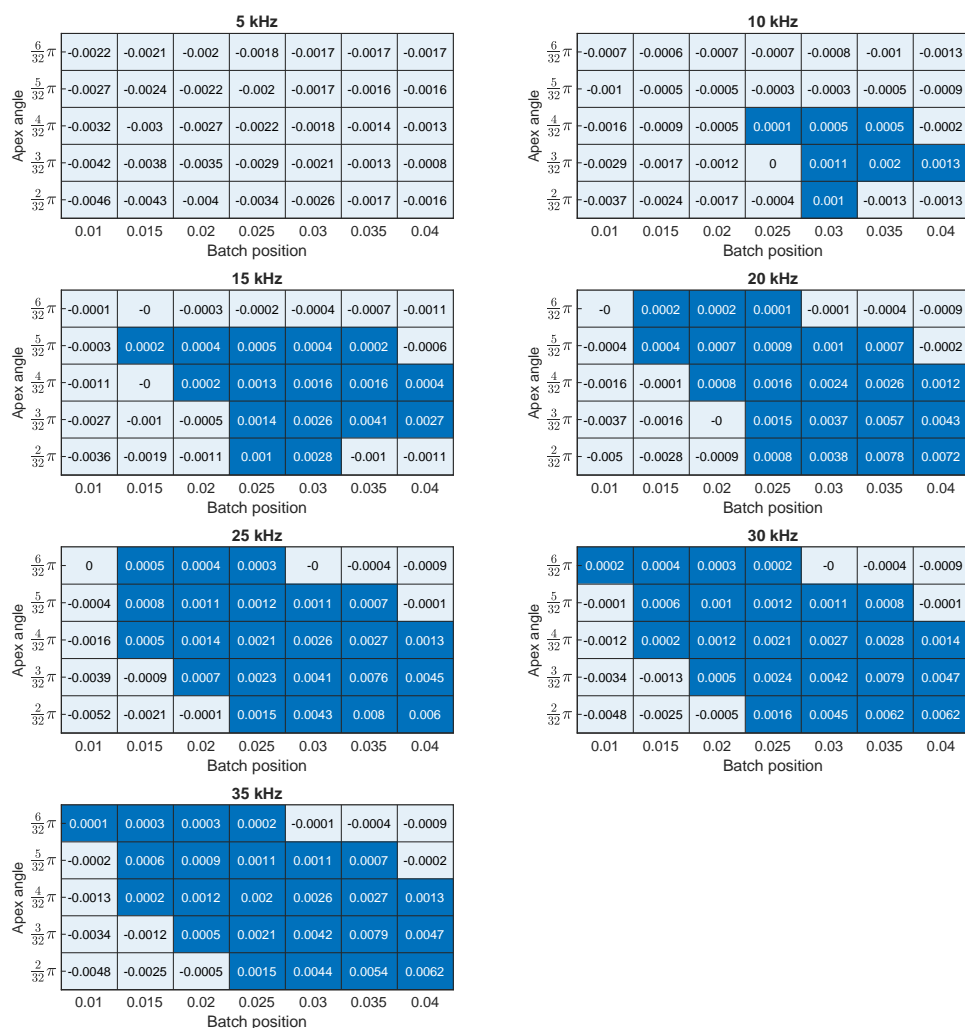


Rysunek 7.1: Układ współrzędnych i siły przyłożone do wsadu. F_z to siła wznosząca, Q_B to siła grawitacji, F_y i F_x to siła pozioma przyłożona do wsadu.

7.2 Wyniki ze wstępnych badań EM

7.2.1 Siły

Kluczową sprawą w tym przypadku jest zdolność lewitacji wewnątrz wzbudnika, która wyraża się w różnicy pomiędzy siłą F_z a siłą grawitacją Q_B działającą na wsad pokazany na rys. 7.2. Dla przebadanych w tym eksperymencie wariantów można wyciągnąć następujące wnioski:



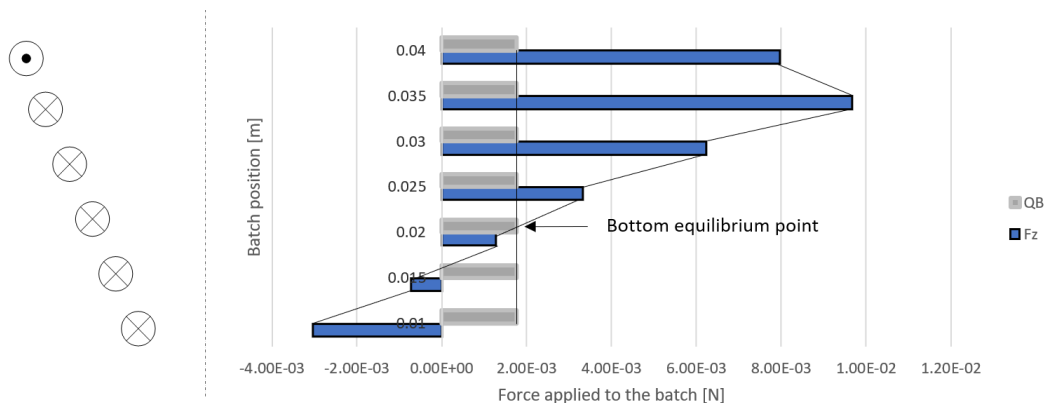
Rysunek 7.2: Różnica pomiędzy pionowymi składowymi (F_z) siły i grawitacji (Q_B) przyłożonej do wsadu w N, dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położeń wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Wartości dodatnie, w których występuje lewitacja, zaznaczono kolorem ciemnoniebieskim

- Dla każdej częstotliwości prądu maksimum F_z zostało uzyskane dla $\alpha = \frac{3\Pi}{32}$ i $z_B = 0,035$ m.
- Maksimum F_z uzyskano dla $f = 30$ kHz.
- Wzrost częstotliwości f powoduje wzrost F_z (w zakresie f od 5 do 30 kHz).
- Zwiększenie α powoduje spadek F_z (w zakresie α od $\frac{6\Pi}{32}$ do $\frac{3\Pi}{32}$)

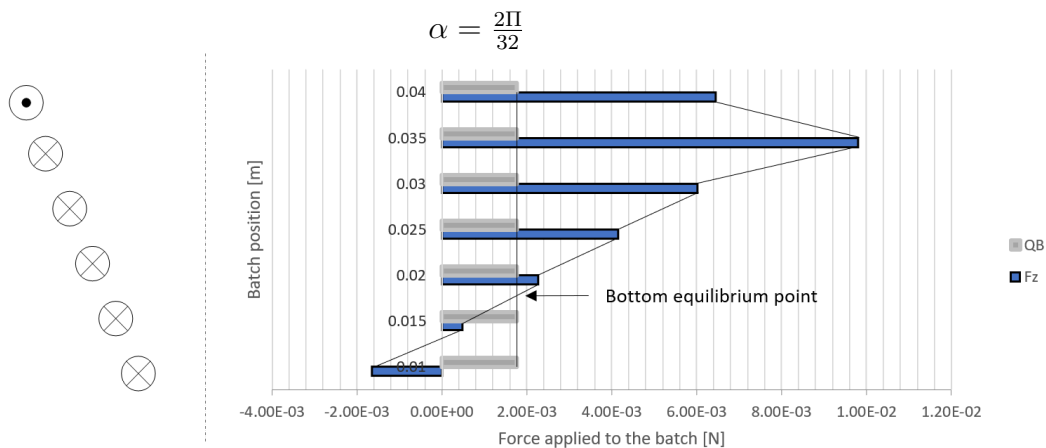
- Każda symulacja wykonana dla $f = 5$ kHz powodowała brak możliwości lewitacji wsadu.

Warunkiem koniecznym topienia lewitacyjnego jest to, aby elektrodynamiczna siła wyporu F_Z była w równowadze z siłą grawitacji Q_B . Z teoretycznego punktu widzenia, dla każdego wzbudnika powinny istnieć dwa punkty, w których ta równowaga występuje [90]. W naszym eksperymencie oba punkty zaobserwowano dla częstotliwości 30 kHz i kąta $\frac{5\pi}{32}$.

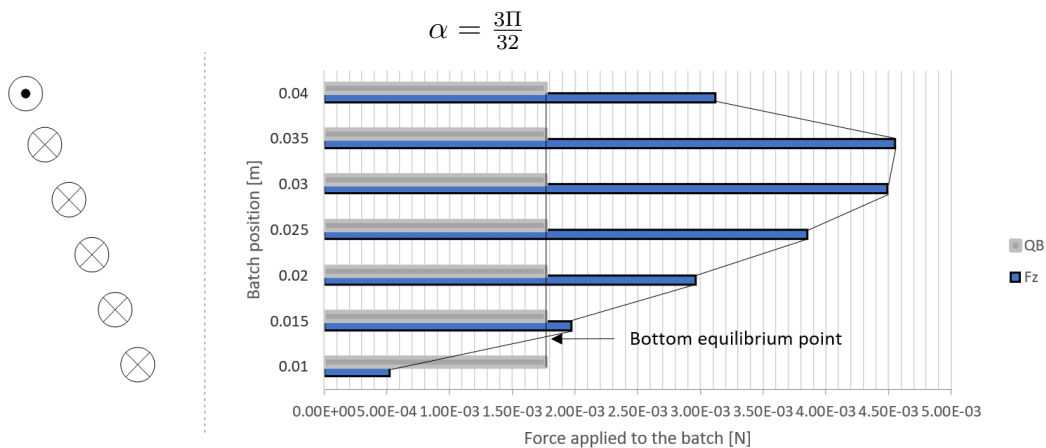
Jeżeli wsad zostanie wzniesiony powyżej górnego punktu równowagi, elektrodynamiczna siła wyporu F_Z stanie się mniejsza od siły grawitacji Q_B , a więc wsad zacznie opadać. Jeżeli jednak wsad przejdzie poniżej tego punktu równowagi, to siła wyporu elektromagnetycznego F_Z będzie większa od Q_B , więc wsad zostanie z powrotem wypchnięty w kierunku górnego punktu równowagi. Dlatego też górny punkt równowagi należy uznać za stabilny, co oznacza, że wsad powinien w nim lewitować podczas procesu topienia [143]. Natomiast inną sytuację można zaobserwować dla dolnego punktu równowagi. Jeśli wsad zejdzie poniżej tego punktu równowagi, to Q_B będzie większe niż F_Z , a więc pociągnie wsad dalej w dół. Powyżej dolnego punktu równowagi wsad jest wypychany w górę w kierunku górnego punktu równowagi. Dlatego ten dolny punkt należy traktować jako niestabilny. Oba punkty równowagi (dolny i górny) pokazane są na rys. 7.7. Odległość między nimi jest skorelowana z wartością α , a więc rośnie, gdy rośnie α .



(a)



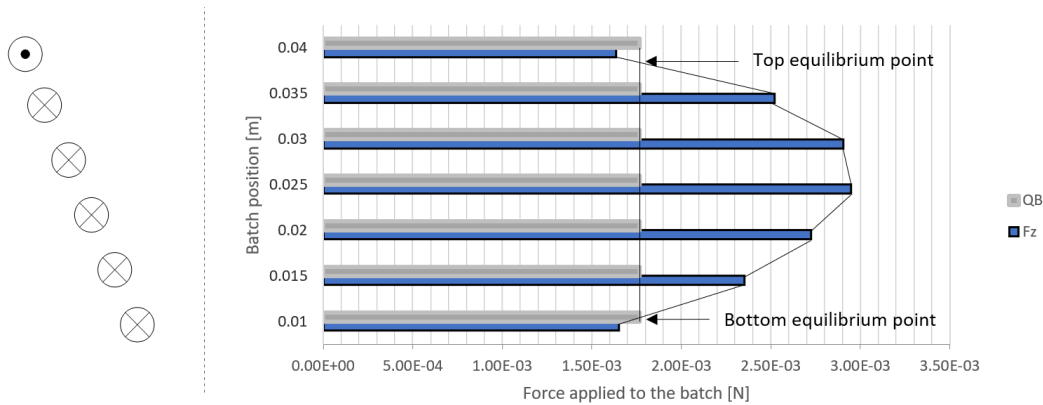
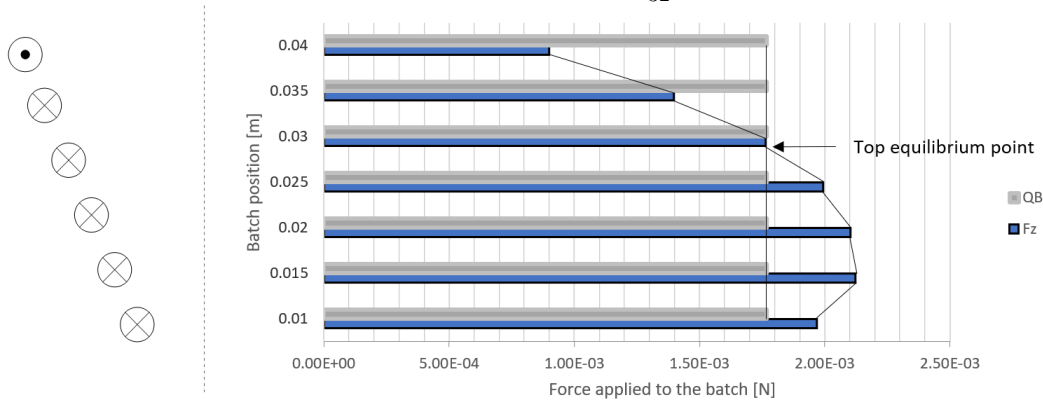
(a)



(a)

$$\alpha = \frac{4\pi}{32}$$

Rysunek 7.6: Zależności pomiędzy F_z i z_B dla $f = 30$ kHz i α od $\frac{2\pi}{32}$ do $\frac{4\pi}{32}$. Po lewej stronie każdej tabeli pokazano przekrój poprzeczny wzbudnika (zgodnie z rys. 5.2) celem wizualizacji położenia wsadu.

Rysunek 7.7: $\alpha = \frac{5\Pi}{32}$ Rysunek 7.8: $\alpha = \frac{6\Pi}{32}$

Rysunek 7.9: Zależności pomiędzy F_z i z_B dla $f = 30$ kHz i $\alpha = \frac{5\pi}{32}$ i $\frac{6\pi}{32}$. Po lewej stronie każdej tabeli pokazano przekrój poprzeczny wzbudnika (zgodnie z rys. 5.2) w celu wizualizacji położenia wsadu.

Dokonano następujących obserwacji:

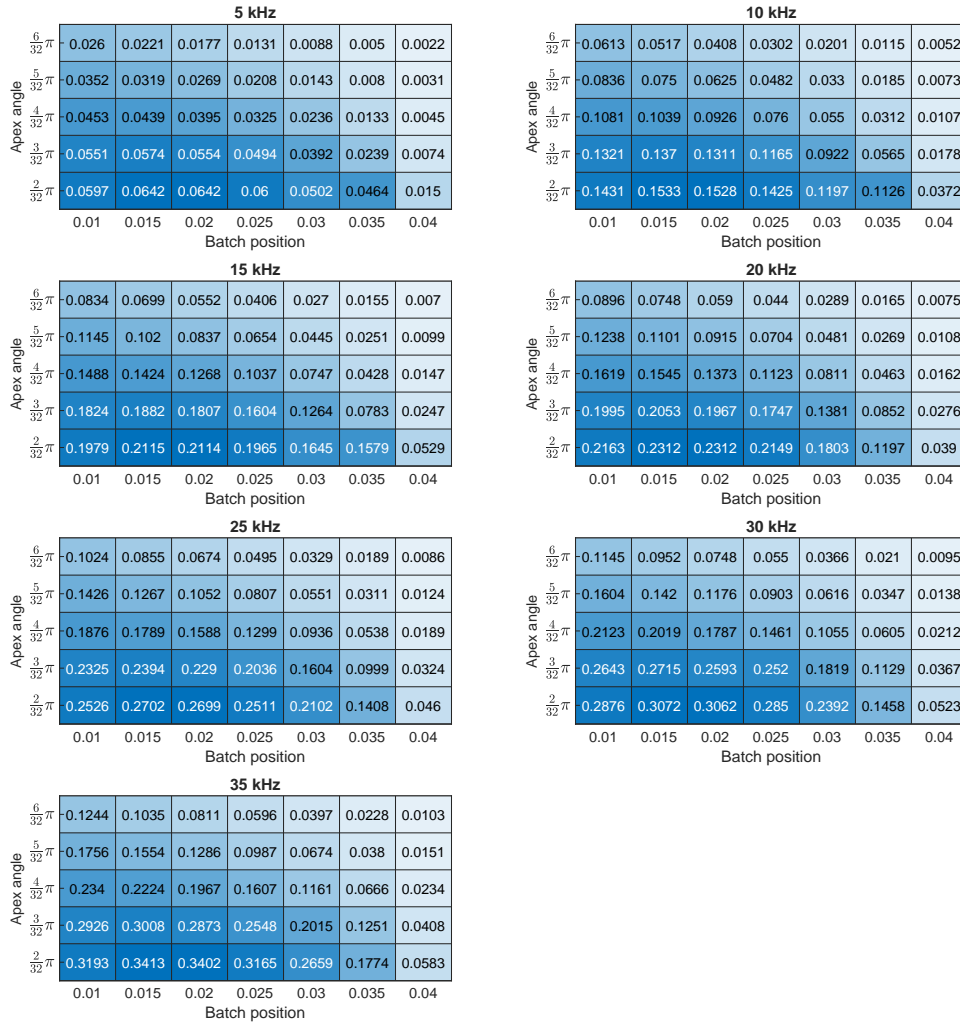
- Dla $\alpha = \frac{5\Pi}{32}$ (rys. 7.7) wartość F_z przypomina funkcję kwadratową o ujemnym nachyleniu. Wsad lewituje w pobliżu górnego przewodu wzbudnika.
- Dla kątów węższych od $\frac{5\Pi}{32}$ (rys. 7.3, 7.4 i 7.5) wartość F_z rośnie z wartością z_B , dopóki położenie jest poniżej wartości $z_B = 0,35$ m. Może wynikać to z faktu, że przewody znajdują się blisko wsadu, co zwiększa F_z wypychając wsad do góry. Górny zwój o przeciwnym prądzie nieco temu przeciwdziała i wsad osiąga stabilne położenie pod górnym przewinięciem.
- Dla kąta $\frac{6\Pi}{32}$ (rys. 7.8) F_z znacznie maleje, gdy z_B rośnie. Wynika to z faktu, że

górną zwój jest zbyt daleko, aby skutecznie oddziaływać na wsad, jest zbyt małe sprzężenie między wsadem a wzbudnikiem. W tym przypadku wsad lewituje.

Wartości składowych poziomych ((F_x, F_y)) siły przyłożonej do wsadu są pomijalnie małe w porównaniu do F_z dlatego ich prezentacja została pominięta w tej części pracy? Wartości tych sił są istotne dla ustalenia kształtu stopionego wsadu i precyzyjnej pozycji w przypadku gdy analiza jest prowadzona jako sprzężona EM-T-FD co zostało przedstawione w rozdziale 9. Warto jednak wspomnieć, że składowe te nie są równe zero ze względu na asymetrię modelu (przewody prowadzące do źródła zasilania oraz zmiana kierunku nawijania przewodu na samej górze).

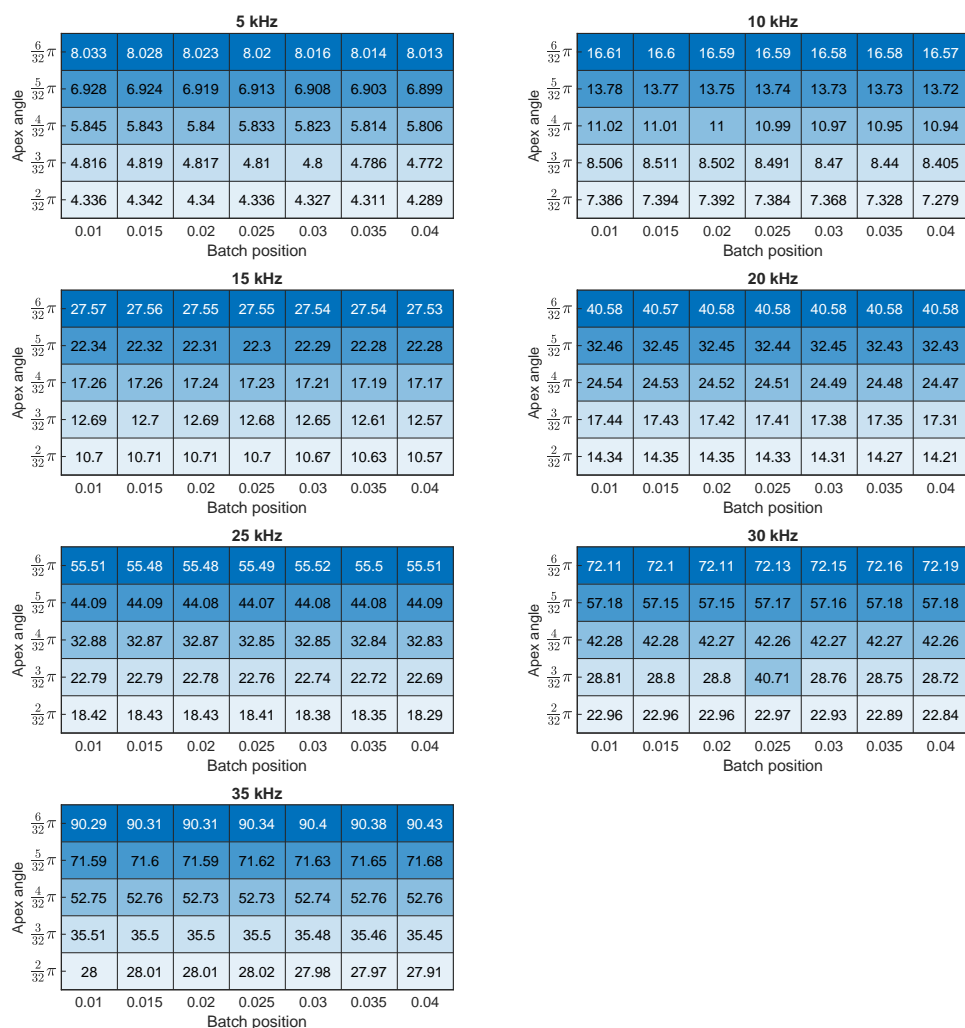
7.2.2 Moc indukowana i dostarczana

Moc indukowana we wsadzie (P_B) przedstawiona jest na rys. 7.10. Jest ona wprost proporcjonalna do f i odwrotnie proporcjonalna do α i z_B . Siła wpływu wszystkich tych zmiennych na P_B jest podobna. Maksymalną moc indukowaną we wsadzie uzyskano dla $f = 35$ kHz, $\alpha = \frac{21}{32}$ i $z_B = 0,01$ m.



Rysunek 7.10: Całkowita moc indukowana we wsadzie (P_B) W , dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położenia wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Ciemniejszy kolor odpowiada większej wartości.

Na rys. 7.11 przedstawiono całkowitą moc dostarczaną do układu (P_T). Kąt α i częstotliwość prądu f mają najbardziej zauważalny wpływ na P_T , natomiast położenie wsadu z_B wydaje się być bez znaczenia. Jeśli α jest mniejszy, całkowita długość zwoju jest również krótsza, co implikuje niższą mocą czynną P_T , wyższa częstotliwość f zwiększa tę moc, podczas gdy z_B wydaje się nie mieć znaczącego wpływu na nią. Mimo że lewitacja nie występuje, maksymalna moc czynna P_T została osiągnięta dla częstotliwości $f = 35$ kHz i kąta $\alpha = \frac{6}{32}$.

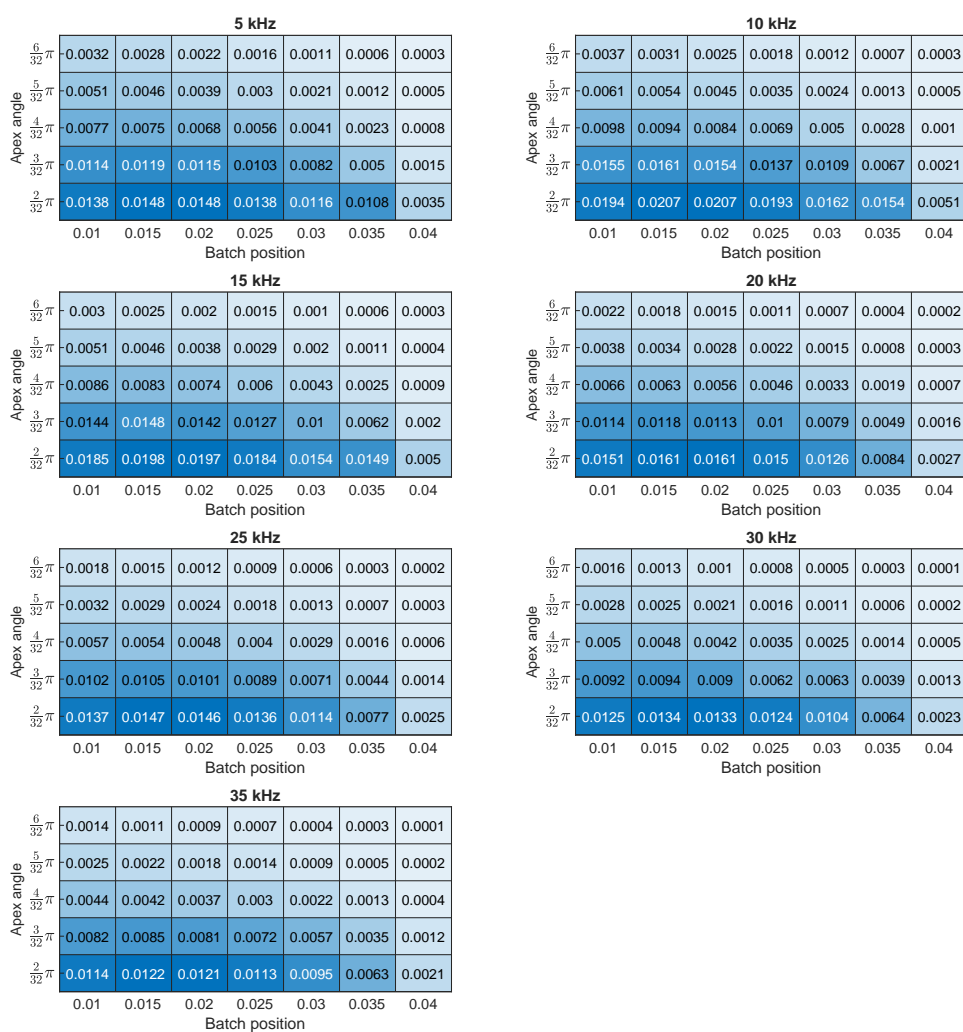


Rysunek 7.11: Całkowita moc dostarczana do wzbudnika (P_T) W , dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położeń wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Ciemniejszy kolor odpowiada większej wartości.

Współczynnik mocy (3.1) przedstawiono na rys. 7.12. Służy do opisu sprawności procesu topienia:

- Maksymalną sprawność (rys. 7.12), przy której występuje lewitacja (rys. Fig. 7.2) uzyskano dla $f = 15$ kHz, $\alpha = \frac{2\pi}{32}$ i $z_B = 0,025$ m.
- Dla każdej f stwierdzono, że proces topienia ma większą sprawność, jeśli α jest niska, a położenie wsadu jest bliskie dolnego zwoju.

- Większą sprawność (rys. 7.12) uzyskano dla $f = 10$ kHz, $\alpha = \frac{2\Pi}{32}$ i $z_B = 0,025$ mm, ale lewitacja nie występuje (rys. 7.2).



Rysunek 7.12: Sprawność dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położen wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Ciemniejszy kolor odpowiada wyższej wartości.

7.2.3 Analiza wybranego wariantu

W celu osiągnięcia wysokiego wyniku ekonomicznego w procesie topienia konieczne jest uzyskanie maksymalnej sprawności energetycznej, która jest istotna tylko w sytuacji, gdy wsad lewituje i znajduje się w górnym punkcie równowagi. Ze względu na fakt, że parametry są punktami izolowanymi, rozważano sprawność procesu dla najwyższej pozycji wsadu, dla której występowała lewitacja 7.2. Dlatego do analizy wybrano wariant z następującym zestawem parametrów: $f = 10$ kHz, $\alpha = \frac{2\pi}{32}$ i $z_B = 0,03$ m.

Dla wybranego wariantu przeprowadzono również analizę stabilności położenia wsadu w kierunkach horyzontalnych. Dla różnych (x, y) przeprowadzono obliczenia, które przedstawiono w tab. 7.1. Siły poziome (F_x i F_y) działają w kierunku przeciwnym do odchylenia poziomego, stabilizując pozycje wsadu. Najmniejsze siły horyzontalne występują dla wariantu $x = 0$; $y = 0,003$.

x [m]	y [m]	F_x [N]	F_y [N]	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ [N]
0	0	1,92E-05	-1,03E-05	2,17883E-05
0,003	0	-1,55E-05	-1,92E-05	2,46757E-05
-0,003	0	2,93E-05	2,26E-05	3,70034E-05
0	0,003	-1,48E-05	-1,36E-05	2,00998E-05
0	-0,003	-2,48E-05	2,26E-05	3,35529E-05

Tabela 7.1: Wyniki symulacji dla różnych odchyżeń w kierunkach horyzontalnych

W ramach analizy końcowej należy sprawdzić, czy dla wybranego wariantu sprawność energetyczna jest wystarczająca do stopienia wsadu. Na podstawie równań ze wstępu teoretycznego 4.2 przeprowadzono analizę termiczną dla wsadu. Zgodnie z rysunkiem 7.10 P_B dla wybranego wariantu wynosi 0,1197 W. Wynik to:

- Jeżeli bierze się pod uwagę tylko promieniowanie. Temperatura ustabilizowała się na poziomie 452°C , co było niewystarczające do osiągnięcia topienia.
- Jeżeli uwzględni się również konwekcję, to uzyskano jeszcze niższą temperaturę 157°C .

Podczas badania możliwych wariantów rozważono szeroki zakres częstotliwości, więc prąd w symulacjach został ustawiony na wartość, która jest łatwo osiągalna dla wszystkich z nich. Na szczęście w wybranym wariantcie zastosowano $f = 10$ kHz, co pozwala

zwiększyć natężenie prądu. Dla większej wartości prądu wzrosło P_B i nastąpiło stopienie wsadu. Obliczenia energii dla wybranego wariantu prowadzą do wyników zestawionych w Tab.7.2

natężenie [A]	P_B [W]	t_m dla radiacji [s]	t_m dla radiacji i konwekcji [s]
200	0,6073	464	nie występuje
300	1,3665	149	239
500	3,7958	48	54

Tabela 7.2: Wyniki symulacji grzania wsadu dla różnych natężeń prądu.

gdzie:

- t_m to czas stopienia wsadu,

Należy wspomnieć, że na tym etapie badań parametry procesu nie są jeszcze w pełni zoptymalizowane, więc topienie jest możliwe, ale czas jest stosunkowo długi.

7.3 Wnioski wynikające ze wstępnych badań EM

Przedstawiony eksperyment dotyczył wielowariantowych obliczeń dla modelu topienia lewitacyjnego, pewnej klasy wzbudników. W eksperymencie zmieniano trzy parametry: kąt połowy wierzchołka, częstotliwość prądu oraz pionowe położenie wsadu. Następnie kontrolowano siły działające na wsad, moc indukowaną we wsadzie oraz moc dostarczaną do wzbudnika. W związku z tym poczyniono następujące obserwacje:

- Maksymalna sprawność elektryczną, w której występuje lewitacja, występuje dla $f = 10$ kHz, $\alpha = \frac{2\pi}{32}$ i $z_B = 0,03$ m.
- Składowa pionowa (F_z) siły przyłożonej do wsadu osiąga maksimum dla $f = 30$ kHz, $\alpha = \frac{3\pi}{32}$ i $z_B = 0,035$ m.
- Największą sprawność elektryczną osiągnięto dla $f = 10$ kHz, $\alpha = \frac{2\pi}{32}$ i $z_B = 0,015$ m, mimo że wsad w tym położeniu nie lewituje.
- Moc indukowana we wsadzie (P_B) jest maksymalna dla częstotliwości $f = 35$ kHz, $\alpha = \frac{2\pi}{32}$ i $z_B = 0,01$ m, jednak wsad nie lewituje.

- Maksimum całkowitej mocy dostarczonej do układu (P_T) uzyskano dla częstotliwości $f = 35$ kHz, $\alpha = \frac{6\pi}{32}$ i $z_B = 0,04$ m, jednak lewitacja nie występuje.
- Potwierdzono stopień wsadu dla wybranego wariantu (dla zwiększonego prądu wzбудnika).

Ponadto wszystkie wyniki uzyskane podczas tego eksperymentu, pozwalają na sformułowanie poniższych twierdzeń:

- Zgodnie z wynikami uzyskanymi dla wszystkich rozważanych wariantów, w przestrzeni rozwiązań nie znaleziono lokalnych ekstremów.
- Twardy warunek lewitacji wsadu pozwala na zastosowanie przybliżonych ograniczeń na parametry modelu zmniejszających rozmiar przestrzeni rozwiązań. Stwierdzono, że f musi być większe od 5 kHz, a jeśli jest równe:
 - 15 kHz to α powinna być mniejsza od $\frac{6\pi}{32}$.
 - W przypadku częstotliwości 10 kHz, wartość współczynnika α powinna być mniejsza niż $\frac{5\pi}{32}$, a położenie wsadu powinno być większe niż 0,02 m.
 - Przy częstotliwości 25 kHz z_B powinno być większe od 0,01 m.

Rozdział 8

Badania EM-T

8.1 Przygotowanie modelu i weryfikacja pomiarowa

8.1.1 Opis problemu

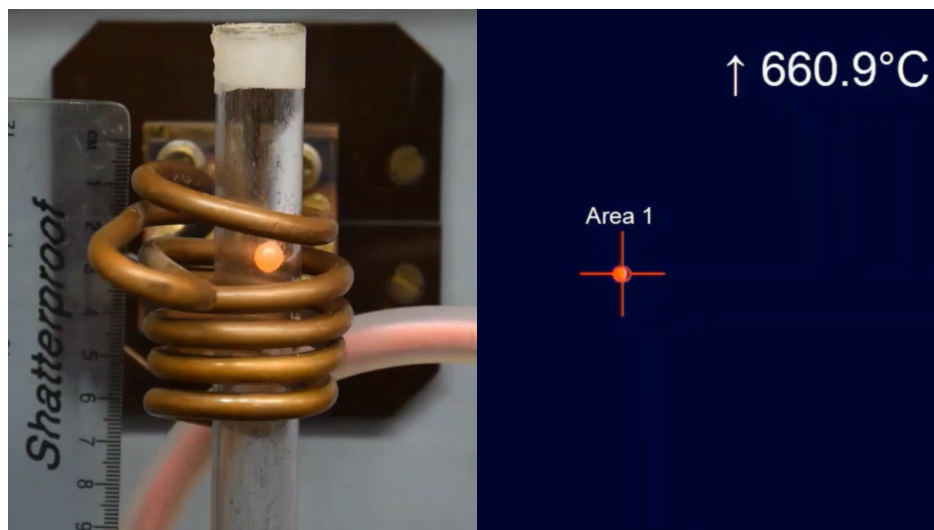
Badania przedstawione w sekcji 8.1 dotyczą walidacji modelu symulacyjnego przedstawionego w 5.3. Model wzbudnika jest przeznaczony do Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego (ETL) i nadaje się do przyszłej optymalizacji. Walidacja modelu opiera się na fizycznym wzbudniku, którego parametry geometryczne są zgodne z przedstawionym modelem. Pomiary są wykonywane z użyciem stanowiska pomiarowego przedstawionego w rozdziale 6.

Walidacja modelu symulacyjnego jest istotne ze względu na potrzebę potwierdzenia wiarygodności uzyskiwanych wyników. Będzie ona polegała na zestawieniu wyników odczytanych ze stanowiska pomiarowego i tych, które są wynikiem symulacji. Badania są przedstawione również w artykule [81].

8.1.2 Metodyka badania

Jako że model obliczeniowy był przygotowywany na podstawie istniejącego wzbudnika, to istnieje pomiędzy nimi zgodność co do parametrów geometrycznych. Wsad i wzbudnik pokazano na rysunku 8.1 po lewej stronie. Na rysunku 8.2, zamieszczono szkic przekroju wzbudnika i wsadu wraz z oznaczeniami. Wsad został wykonany z aluminium, które miało kształt kuli o promieniu (r_B) równym 3 mm. Aluminium zo-

stało wybrane jako materiał wsadowy ze względu na niską gęstość i niską temperaturę topienia. Inni badacze również go używali [99, 103, 113, 114].



Rysunek 8.1: Klatka numer 12 282 z kamery wideo (lewy) i wideo termowizyjnego (prawy). Jedna klatka trwała 0,008 s, więc obraz był wyświetlany 98,256 s po wprowadzeniu wsadu.

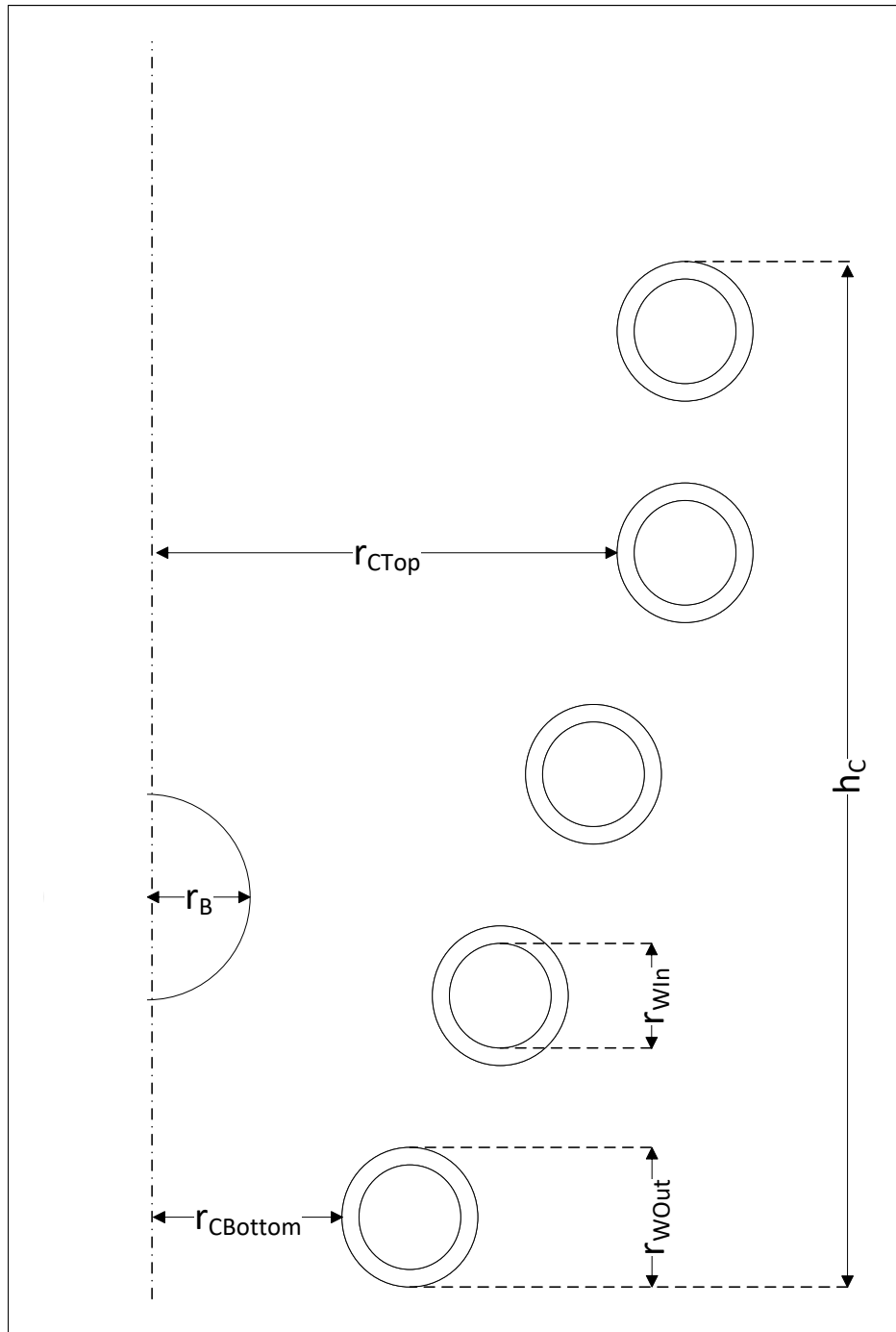
Przewód wzbudnika jest wykonany z miedzi i ma kształt rury, jest nawinięty cztery razy w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara i jeden raz w kierunku przeciwnym. Wzbudnik był aktywnie chłodzony przez wodę, która przepływała wewnątrz rurki. Parametry geometryczne wzbudnika podano w tabeli 8.1.

Tabela 8.1: Parametry geometryczne wzbudnika. Graficzną reprezentację każdego symbolu przedstawiono na rys. 8.2.

Symbol	Znaczenie	Wartość [mm]
r_{WIn}	Wewnętrzna średnica przewodu	4
r_{WOut}	Zewnętrzny średnica przewodu	6
$r_{CBottom}$	Dolny promień wzbudnika	14
r_{CTop}	Górny promień wzbudnika	18
h_C	Całkowita wysokość wzbudnika	40

Parametry elektryczne mierzone na wzbudniku miały wartości, które zestawiono w tabeli 8.2. Pomiary wykonano z użyciem metodyki i sprzętu przedstawionego w rozdziale 6. Powyższe pomiary przeprowadzono z i bez wsadu, ale wykresy odczytane z oscyloskopu nie wykazały znaczących różnic.

Komputer użyty do symulacji modelu miał procesor Intel i7-3770 3,4 GHz, 16 GB



Rysunek 8.2: Szkic przekroju wzбудnika. Skróty wyjaśniono w tabeli 8.1.

pamięci RAM i 1800 GB miejsca na dysku. Korzystano z 64-bitowego systemu operacyjnego Windows 10. Możliwości obliczeniowe dostępnego sprzętu ograniczały możliwość użycia zbyt złożonego modelu, zwłaszcza że model będzie wykorzystywany do celów optymalizacyjnych, co wymaga dużej liczby kolejnych symulacji. Dlatego też czas ob-

Tabela 8.2: Parametry elektryczne

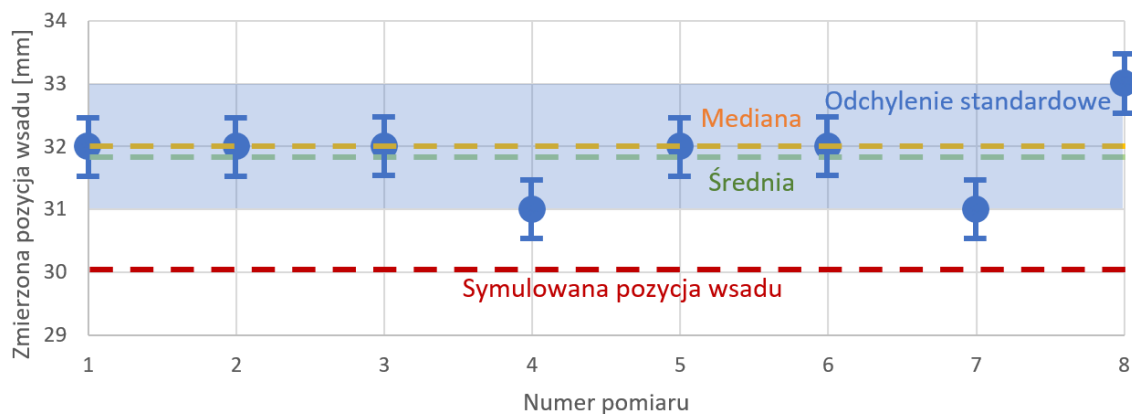
Charakterystyka	Wartość
Natężenie	340 A
Napięcie	520 V
Przesunięcie fazowe	95°
Częstotliwość	277777 Hz

liczeń nie mógł być zbyt długi, gdyż w przeciwnym razie użyteczność modelu byłaby bardzo ograniczona.

8.1.3 Wyniki

Siła wznosząca

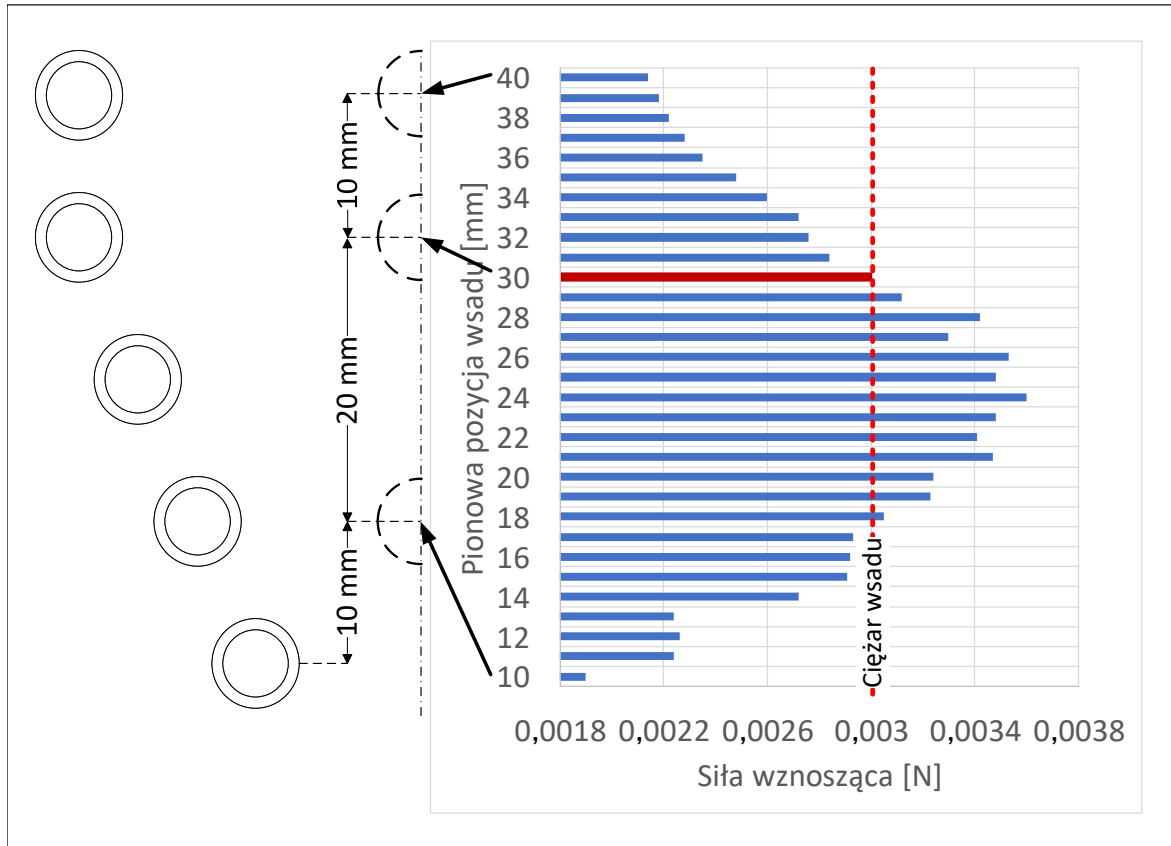
Podczas pomiarów i symulacji wsad lewitował wewnątrz wzbudnika w stabilnej pozycji w trakcie i po stopieniu. Pozycje wsadu wyrażoną jako z_B z rysunku 8.2 przedstawiono na rys. 8.3.



Rysunek 8.3: Miejsce lewitacji wsadu. Żółta przerywana linia pokazuje medianę pozycji wsadu, a zielona przerywana linia pokazuje średnią pozycję wsadu. Czerwona przerywana linia pokazuje pozycję wsadu obliczoną na podstawie modelu obliczeniowego. Jasnoniebieska ramka pokazuje odchylenie standardowe.

Pionowe położenie wsadu podczas pomiarów wynosiło 32 mm. Dla symulowanego modelu szukano pozycji, w której wsad lewituje. Siła wznosząca została obliczona zgodnie z (4.13) i (4.14). W tym celu obliczono siłę wznoszącą dla wsadu w pozycjach od 10 mm od dna wzbudnika do 40 mm. Wartości siły wznoszącej pokazano na rys.

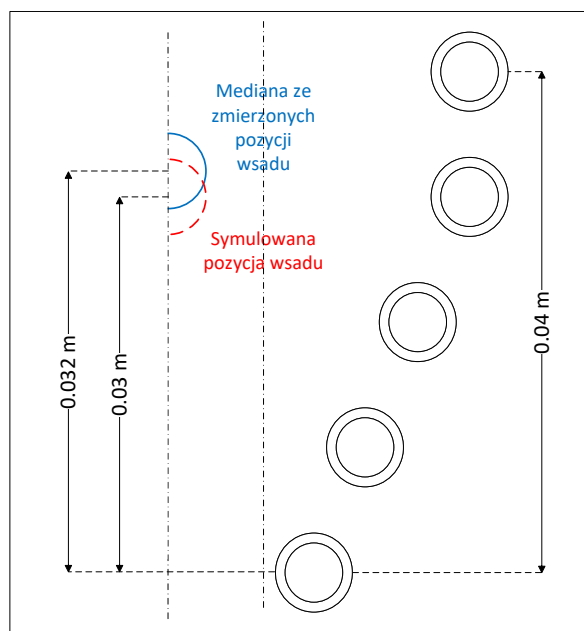
8.4. Siła grawitacji działająca na wsad (zaznaczona czerwoną przerywaną linią) wynosiła około 0,003 N, więc istniały dwa położenia, a mianowicie 17 i 30 mm, w których siły te kompensowały się wzajemnie (punkty równowagi), umożliwiając w ten sposób lewitację wsadu.



Rysunek 8.4: Siła wznosząca działała na wsad (oś pozioma) w zależności od wysokości, na której znajdował się wsad (oś pionowa). Czerwona przerywana linia to siła grawitacji działająca na wsad. Ciemnoczerwony pasek na wykresie to stabilny punkt równowagi.

W położeniu 17 mm gdyby obniżyć położenie wsadu to spowoduje to spadek siły wznoszącej i wsad by wypadł ze wzbudnika. Z drugiej strony podwyższenie pozycji wsadu zwiększyłyby siłę wznoszącą i wsad zaczął się unosić w kierunku górnego punktu równowagi. W konsekwencji punkt ten stanowi niestabilny punkt równowagi. W pozycji 30 mm obniżenie pozycji wsadu zwiększa siłę wznoszącą, co powoduje powrót do punktu równowagi. Natomiast podwyższenie pozycji wsadu zmniejsza siłę wznoszącą, co również powoduje powrót do punktu równowagi. Oznacza to, że ta pozycja jest stabilnym punktem równowagi i dla tej pozycji należy przeprowadzić dalsze obliczenia [85]. Obliczona pozycja wsadu 30 była o 2 mm niższa niż pozycja wsadu zarejestrowana przez

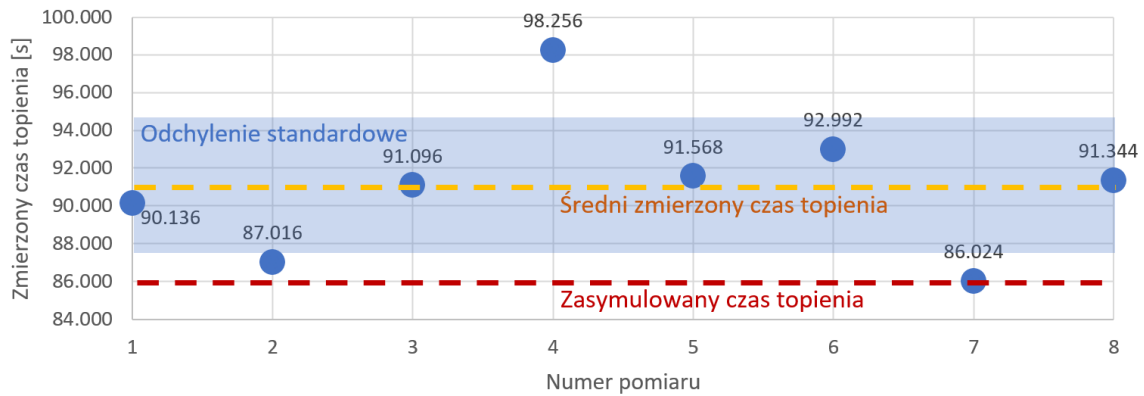
kamerę. Różnica ta może wynikać z odkształceń wzbudnika, które nie zostały zamodelowane. Porównanie pozycji lewitującego wsadu zaobserwowanej podczas pomiarów i obliczonej podczas symulacji pokazano na rys. 8.5.



Rysunek 8.5: Porównanie pozycji lewitacji wsadu zaobserwowanych podczas pomiarów i obliczonych podczas symulacji. Pozycje z pomiarów są oznaczone kolorem niebieskim, a pozycje z symulacji są oznaczone kolorem czerwonym.

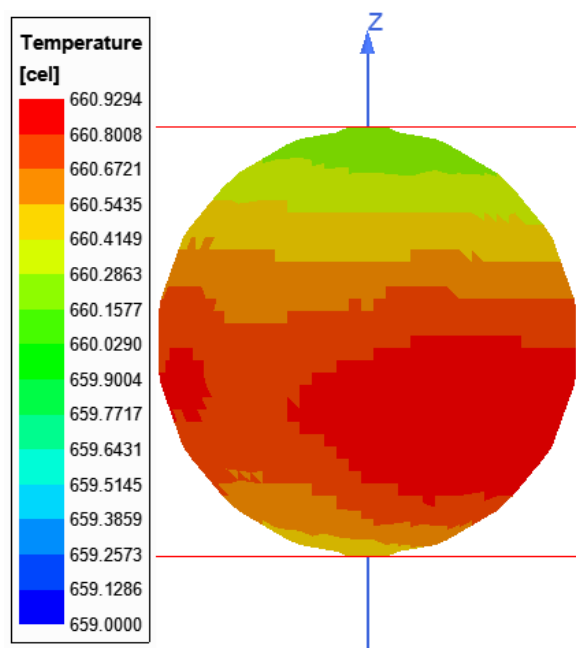
Zmiana temperatury wsadu

Czas, w którym wsad osiągał temperaturę topienia, był określany na podstawie zestawienia nagrań z kamery termowizyjnej i kamery wideo. Na podstawie tych zapisów przedstawiono wyniki na rys. 8.6. Mediana i średnia pomiarów czasu topienia wyniosły 91 s. Odchylenie standardowe wyniosło 3,7497 s.

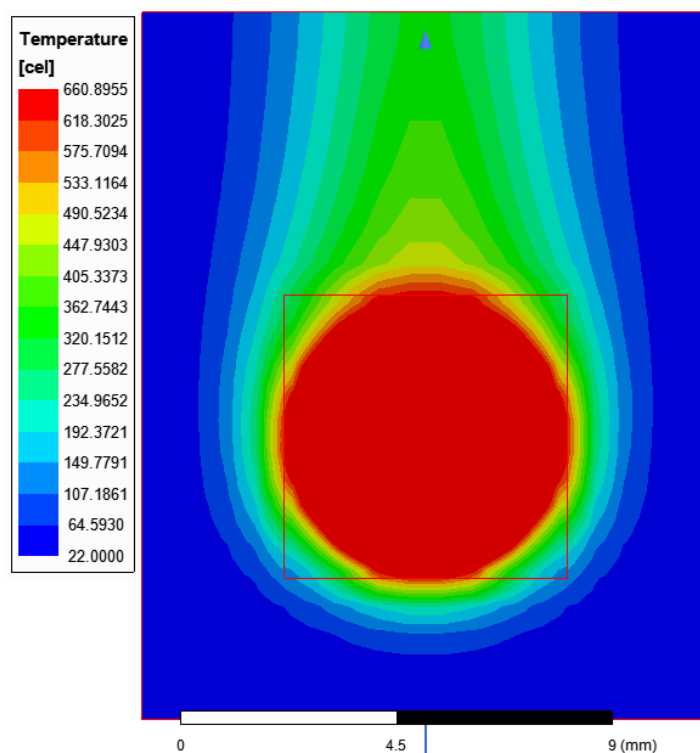


Rysunek 8.6: Porównanie czasów topienia wsadu dla kolejnych pomiarów z wynikami symulacji. Pomiary są pokazane na niebiesko, a wynik symulacji jest pokazany jako czerwona przerywana linia. Jasnoniebieska ramka pokazuje odchylenie standardowe. Średnie zmierzone czasy są reprezentowane przez żółtą przerywaną linię. Czas został zmierzony na podstawie liczby klatek między wprowadzeniem wsadu a momentem osiągnięcia temperatury topienia. Częstotliwość odświeżania kamery wynosiła 125 Hz, więc dokładność pomiaru wynosiła 0,008 s, co czyni go niewidocznym na rysunku.

W wyniku symulacji uzyskano temperaturę topienia w czasie 86 s. Rozkład ciepła na powierzchni wsadu pokazano na rys. 8.7. Temperatura była wyższa w miejscach, w których wsad znajdował się bliżej wzbudnika. Efekt konwekcji jest widoczny na rys. 8.8. Dla modelu termicznego osiągnięto temperaturę topienia o 5 s szybciej w porównaniu z medianą pomiarów. Źródłem problemu może być niedoskonałe modelowanie wzbudnika, zanieczyszczenia w materiale, z którego wykonany jest wzbudnik i wsad lub wahania parametrów prądu. Jak pokazano na rys. 8.6, powtarzalność samego pomiaru miała odchylenie standardowe wynoszące 3,46 s. Różnice te były prawdopodobnie spowodowane dużą dynamiką zjawiska topienia lewitacyjnego. Podczas lewitacji wsad oscylował wokół punktu równowagi, a te stochastyczne oscylacje prawdopodobnie powodowały różne czasy topienia.



Rysunek 8.7: Symulacja grzania wsadu w czasie 86 s od rozpoczęcia procesu.



Rysunek 8.8: Symulacja podgrzewania wsadu i otaczającego powietrza w czasie 86 s od rozpoczęcia procesu. Widoczne są efekty konwekcji.

8.1.4 Wnioski z weryfikacji modelu

Parametry elektryczne modelu symulacyjnego zostały wprowadzone na podstawie pomiarów wykonanych na stanowisku pomiarowym, na którym był badany wzbudnik. Na podstawie geometrii dostępnego wzbudnika przygotowano model geometryczny oraz silnie sprzężony elektromagnetyczno-temperaturowy model obliczeniowy. Wyciągnięto następujące wnioski:

- Symulowany czas topienia wynosi 86 s, czyli 5 s szybciej niż mediana zmierzonego czasu.
- Lewitacja wsadu występuje w pozycji 30 mm, czyli 2 mm niżej w porównaniu do pomiarów.
- Czas obliczeń modelu wynosi około 50 minut, co jest akceptowalne dla przyszłych zastosowań predykcyjnych.

Celem proponowanego modelu symulacyjnego jest przeprowadzenie obliczeń w celu zbadania wpływu zmiany geometrii na proces topienia. Co więcej, geometria wzbudnika powinna zostać zoptymalizowana w celu zwiększenia sprawności procesu topienia. Precyzję obliczeniową modelu uznano za wystarczającą.

8.2 Optymalizacja wzbudnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego dla kulistego wsadu

8.2.1 Opis problemu

W tym rozdziale przedstawiono proces optymalizacji wzbudnika do ETL. Optymalizacja ma na celu maksymalizację sprawności procesu w danych warunkach prądowych poprzez zmianę geometrii wzbudnika. Optymalizacja ta jest uzasadniona ekonomicznie poprzez zmniejszenie kosztów procesu.

Geometria początkowa wzbudnika jest zgodna z tą walidowaną w sekcji 8.1. Opis modelu można znaleźć w sekcji 5.3. Jedynym odstępstwem od tego modelu jest to, że

z punktu widzenia procesu optymalizacji nie ma konieczności, żeby uwzględniać sprzężenie zwrotne temperatury. Dodatkowo skomplikowałoby to rozważany model i potencjalnie uniemożliwiło wielokrotne jego rozwiązywanie. Ze względu na ograniczony czas dostępny badaczom i ograniczoną moc dostępnej platformy sprzętowej.

8.2.2 Funkcja celu, zmienne i ograniczenia

Przedmiotem optymalizacji jest sprawność procesu (3.1), rozumiana jako stosunek mocy czynnej we wsadzie do całkowitej mocy czynnej we wsadzie i wzbudniku.

Zmienne modelu zostały przedstawione na rys. 8.9. Ich znaczenie jest następujące:

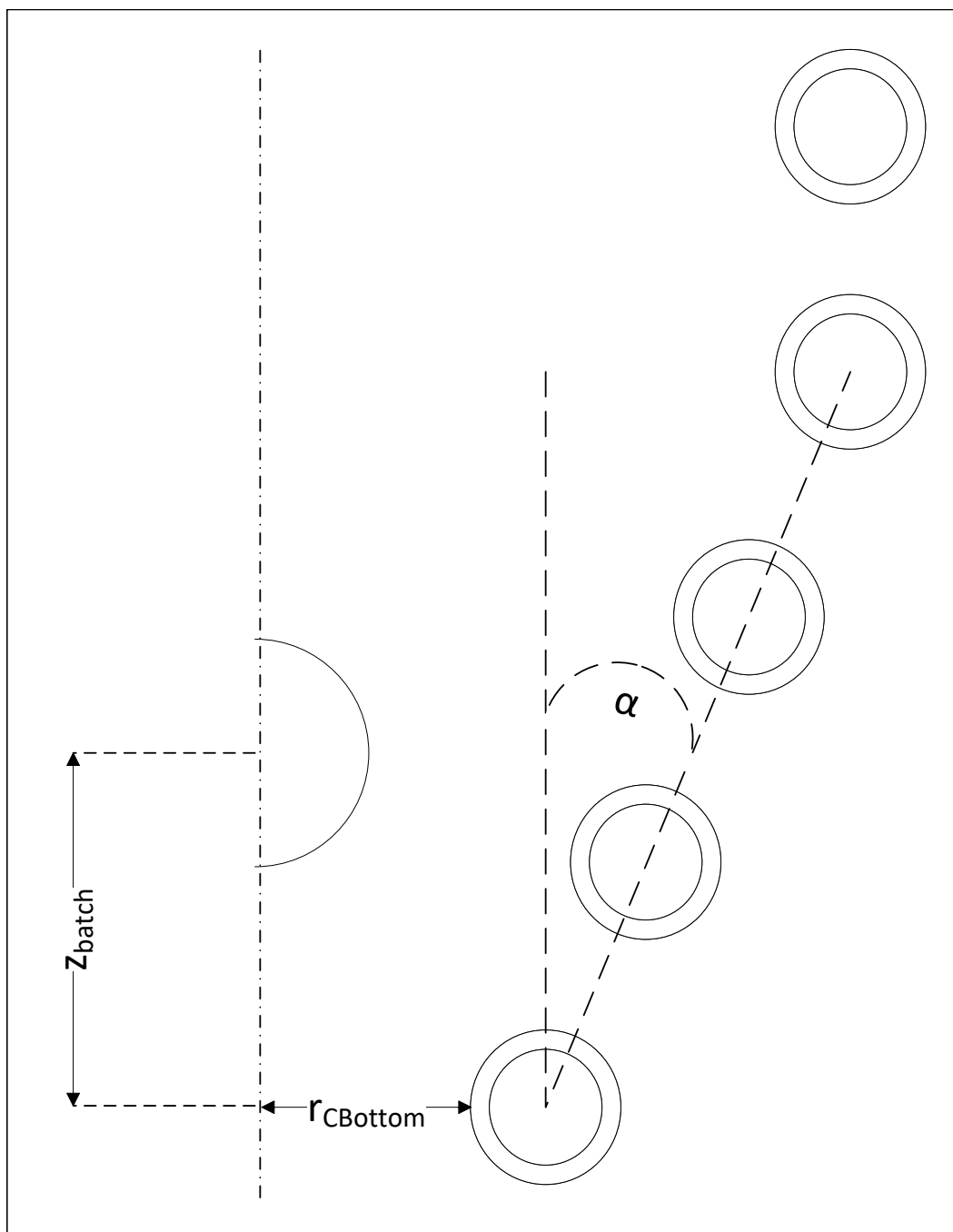
- α - kąt nachylenia wzbudnika,
- $r_{cBottom}$ - dolny promień wzbudnika,
- z_{batch} - położenie wsadu wewnątrz wzbudnika. Parametr ten nie jest optymalizowany, ale ma wartość, dla której równanie (8.1) jest spełnione.

Głównym ograniczeniem jest to, że wsad musi lewitować wewnątrz wzbudnika. Stabilna lewitacja występuje, gdy siła grawitacji jest równa sile wznoszenia. Jest to ważne, ponieważ wsad może poruszać się wewnątrz wzbudnika z powodu niewłaściwego podawania do środka. Jeżeli odchyłka jest niewielka, powoduje to oscylacje wsadu, jeżeli zbyt duża to wsad nie utrzymuje się we wzbudniku. Oznacza to, że warunek (8.1) musi być spełniony z dopuszczalnym marginesem bezpieczeństwa. Ponadto wsad musi znajdować się wewnątrz wzbudnika (8.2). Również $r_{cBottom}$ jest ograniczone, zgodnie z naszym doświadczeniem najniższa wartość bezpieczna w użyciu, jest trzy razy większa od promienia wsadu (8.3). Ostatnie ograniczenie jest związane z α , musi być dodatnie (8.4). Założono, że prąd płynący przez wzbudnik ma stałe parametry podane w tabeli 8.2.

$$F_{EM}(V_{batch}) = Q(V_{batch}) \quad (8.1)$$

$$0 < z_{batch} < h_{inductor} \quad (8.2)$$

$$r_{cBottom} > 3 \cdot r_{batch} \quad (8.3)$$



Rysunek 8.9: Przekrój wzbudnika z zaznaczonymi zmiennymi.

$$\alpha > 0$$

(8.4)

gdzie:

- F_{EM} - siła elektrodynamiczna,
- Q - siła grawitacji,
- $h_{inductor}$ - wysokość wzbudnika,
- r_{batch} - promień wzbudnika,
- α - kąt wierzchołka wzbudnika.

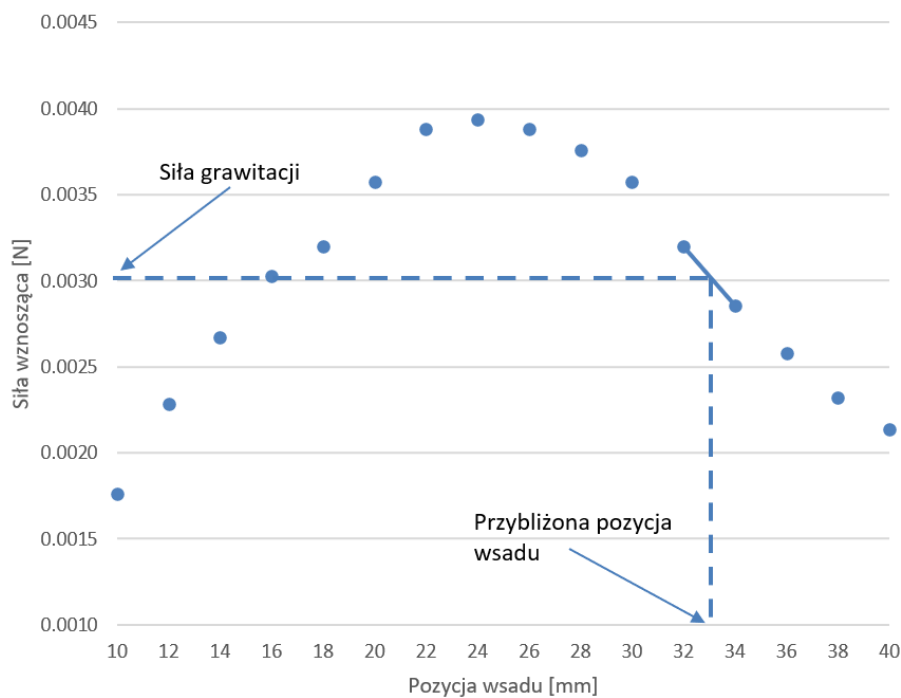
8.2.3 Przestrzeń rozwiązań

W ramach przygotowań do optymalizacji przeprowadzono próbkowanie przestrzeni rozwiązań. Symulacja obejmuje obliczenie siły wznoszącej przyłożonej do wsadu (F_z) i sprawność procesu (η). Symulację przeprowadzono dla następujących wartości parametrów:

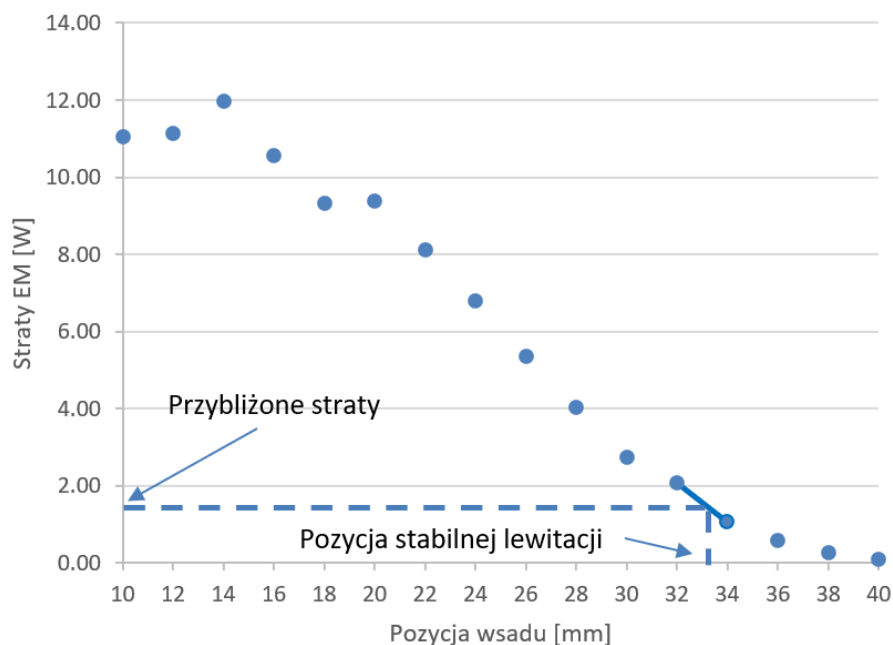
- położenie wsadu we wzbudniku (z_{batch}) w zakresie $< 10; 40 >$ mm z krokiem 2 mm,
- dolny promień wzbudnika ($r_{cBottom}$) w zakresie $< 18; 27 >$ mm,
- kąt wierzchołka wzbudnika (α) w zakresie $< 0,02; 0,06 >$.

Dla pojedynczych $r_{cBottom}$ i α charakterystyka wzbudnika ma dwa położenia wsadu, w których F_z jest równe sile grawitacji. Wyższa z nich jest uważana za stabilną, ponieważ po wytrąceniu z tej pozycji wsad powróci do niej. Aby obliczyć przybliżenie pozycji wsadu, założono, że wartość siły zmienia się między krokami F_z zgodnie z funkcją liniową (rysunek 8.10). W rezultacie określana jest pozycja wsadu.

Wszystkie wykresy sprawności mają podobny kształt; jeden z nich można zobaczyć na rysunku 8.11. Jak można zaobserwować, stabilna lewitacja wsadu występuje w przedziale między 30 a 34 mm. Aby przybliżyć sprawność, wyznaczono funkcję liniową na podstawie dwóch pozycji wsadu, które są najbliższe stabilnej pozycji lewitacji. Używając przybliżonej stabilnej pozycji jako argumentu, przybliżona sprawność została obliczona dla każdego wariantu i podsumowana w tabeli 8.3.



Rysunek 8.10: Przybliżenie pozycji wsadu na podstawie dwóch punktów, w których siła skierowana w górę była najbliższa sile grawitacji.



Rysunek 8.11: Przybliżenie mocy czynnej we wsadzie na podstawie znajomości stabilnej pozycji lewitacji.

Tabela 8.3: Sprawność procesu zależy od kąta nachylenia i dolnego promienia wzbudnika. Miejsca, w których zaobserwowano lokalne optima, zaznaczono pogrubionym tekstem, a puste obszary oznaczają, że obliczenia nie zostały wykonane dla danego zestawu parametrów. Znak $\#$ oznacza, że lewitacja nie jest możliwa dla tego zestawu parametrów.

		Promień [mm]									
		18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Kąt	0,2	0,0039		0,0042		0,0047		0,0069	0,0062	$\#$	$\#$
	0,25				0,0041	0,0059	0,0065	0,0066			
	0,3	0,0045		0,0044	0,0054	0,0072	0,0045	0,0080			
	0,35				0,0056	0,0057	0,0063	0,0079			
	0,4	0,0044		0,0054		0,0066	0,0080	$\#$			
	0,45				0,0054		0,0064				
	0,5	$\#$		0,0053		0,0074		$\#$			
	0,55										
	0,6	$\#$		$\#$		$\#$		$\#$			

Sprawność procesu została przedstawiona w tabeli 8.3 i można ją opisać w następujący sposób:

- Sprawność procesu zwykle wzrasta wraz ze wzrostem promienia i α .
- Istnieje więcej niż jedno lokalne optimum (zaznaczone pogrubionym tekstem).
- Najbardziej obiecujące wyniki znajdują się w pobliżu obszarów, w których lewitacja nie występuje (obszary, w których lewitacja nie występuje, są oznaczone symbolem $\#$).

8.2.4 Wybór algorytmu optymalizacyjnego

Na podstawie próbkowania przestrzeni rozwiązań (tabela 8.3) zauważono, że istnieje więcej niż jedno optimum lokalne. Oznacza to, że lokalne strategie wyszukiwania mogą nie być wystarczające i konieczna jest globalna strategia wyszukiwania [18]. Bardzo obiecujący jest algorytm ewolucyjny ze względu na możliwość uniknięcia zatrzymania się algorytmu na pierwszym napotkanym optimum lokalnym. Dodatkowo ten algorytm jest dobrze udokumentowany i szeroko wykorzystywany przez badaczy [69, 111, 147].

Według K. Sorensen [112] znaczna część metaheurystyk optymalizacji globalnej daje zbliżone wyniki. Na podstawie tego założenia postanowiono, ze względu na przedstawione wcześniej zalety, zostać przy algorytmie genetycznym.

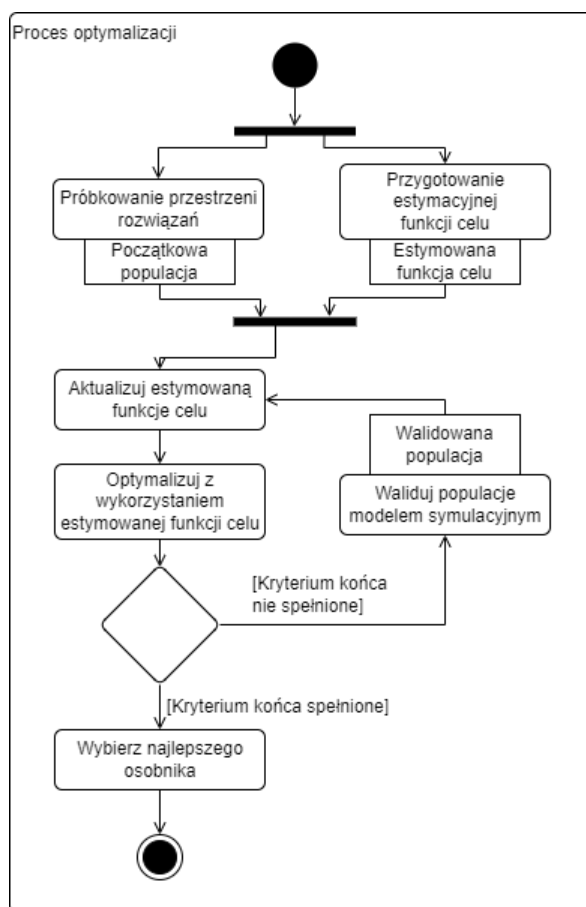
Początkowo dla wszystkich osobników i ich potomków planowano dokonywać symulacji odpowiadającego im modelu obliczeniowego. Jednak jak się okazało, głównym ograniczeniem technicznym podczas badań jest czas obliczeń wymagany dla pojedynczego modelu symulacyjnego. Pojedyncze obliczenia zajmują ponad godzinę, co znacznie wydłuża proces optymalizacji. Aby przewyciężyć to ograniczenie, na podstawie wszystkich dotychczasowo obliczonych wariantów (w pierwszej iteracji 36, w każdej następnej o 5 więcej) funkcja celu jest przybliżana modelem wielomianowym (8.5), na którym potem dokonywane jest 1000 iteracji optymalizacji. Następnie wyniki optymalizacji są walidowane na modelu symulacyjnym. Na podstawie nowych danych aktualizowane są parametry modelu matematycznego, a cała procedura rozpoczyna się od początku. Proces zostaje zakończony, gdy określona liczba kolejnych rozwiązań nie przyniesie znaczącej poprawy. Procedura została przedstawiona na rys. 8.12 i 8.13.

$$(\alpha^5 \cdot a + \alpha^4 \cdot b + \alpha^3 \cdot c + \alpha^2 \cdot d + \alpha \cdot e) + (r_{cBottom}^5 \cdot f + r_{cBottom}^4 \cdot g + r_{cBottom}^3 \cdot h + r_{cBottom}^2 \cdot i + r_{cBottom} \cdot j) + k \quad (8.5)$$

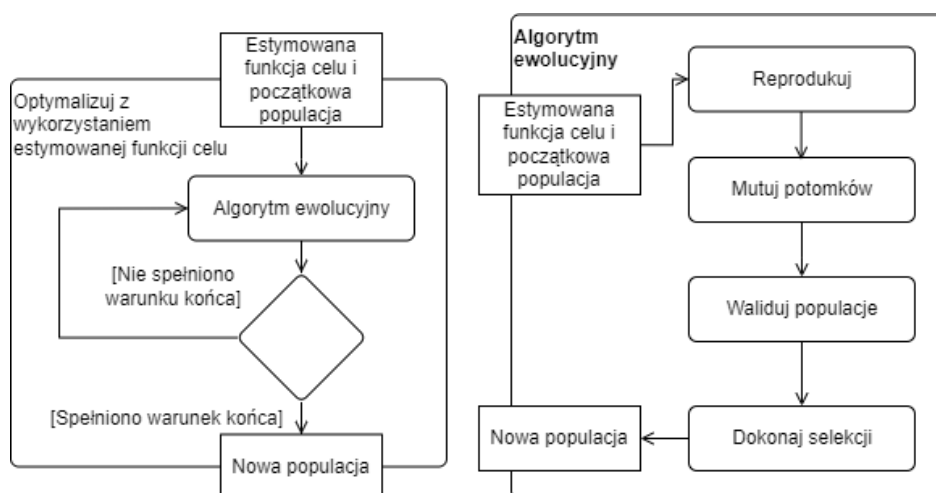
8.2.5 Algorytm ewolucyjny

Algorytm ewolucyjny (rys. 8.12 i 8.13) przyjmuje jako populację początkową w pierwszym kroku modele symulowane podczas próbkowania przestrzeni rozwiązań. Wielkość populacji początkowej została ustawiona na 30 osobników, w kolejnych iteracjach została zmniejszona do 5 osobników. Populacja początkowa będzie traktowana jako rodzice dla nowego pokolenia, które będzie miało wprowadzone mutacje. Cała populacja zostanie poddana walidacji i selekcji. Podczas selekcji najlepsze rozwiązanie zostanie automatycznie zapamiętane, ale niekoniecznie wybrane. Nowa populacja będzie wybierana losowo, z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do jakości rozwiązania.

Algorytm optymalizacji został zaimplementowany w języku Python i sprawdzony z funkcjami multimodalnymi z dwoma parametrami i znanym globalnym ekstremum. Po walidacji program optymalizacyjny został połączony ze skryptami Ansys. Czas obliczeń potrzebny do przeprowadzenia optymalizacji wynosi 174 godziny.



Rysunek 8.12: Proces optymalizacji.



Rysunek 8.13: Sposób sprzężenia algorytmu ewolucyjnego z procesem optymalizacji.

W załączniku A przedstawiono pseudokod implementacji używanego algorytmu przeszukiwania globalnego. Oto najważniejsze założenia implementacyjne tego kodu

związanego z algorytmem ewolucyjnym:

- Rozmiar populacji:
 - Maksymalna liczba osobników w populacji jest ustalona na 5. Liczba ta wynika z tego, że wszyscy członkowie populacji są walidowani z użyciem modelu symulacyjnego, którego obliczenia są bardzo kosztowne.
- Współczynnik mutacji:
 - Parametry osobników mogą być zmieniane w procesie mutacji o wartość losową w zakresie od -0,1 do 0,1 (8.6).

$$\text{mutacja} \in [-0, 1; 0, 1] \quad (8.6)$$

- Liczba iteracji:
 - Algorytm wykonuje maksymalnie 1000 iteracji.
- Populacja początkowa:
 - Populacja początkowa może być przekazana jako argument podczas inicjalizacji. Jeśli nie zostanie podana, będzie pusta. Jako populacja początkowa jest wykorzystywana populacja z poprzedniej iteracji, a podczas pierwszego uruchomienia jest wykorzystywana populacja z badania przestrzeni rozwiązań.
- Reprodukacja:
 - Reprodukacja polega na krzyżowaniu parametru A i B kolejnych par osobników w populacji. Nowe parametry są średnią arytmetyczną wartości parametrów rodziców (8.7) i (8.8).

$$A_{\text{dziecka}} = \frac{A_{\text{rodzica}_1} + A_{\text{rodzica}_2}}{2} \quad (8.7)$$

$$B_{\text{dziecka}} = \frac{B_{\text{rodzica}_1} + B_{\text{rodzica}_2}}{2} \quad (8.8)$$

- Dla każdego osobnika w populacji (z wyjątkiem ostatniego) tworzony jest jeden potomek, który zostaje dodany do populacji.

- Mutacja:

- Mutacja dotyczy nowo powstałych potomków.
- Parametry A i B każdego potomka są modyfikowane przez dodanie wartości losowej z przedziału od -0,1 do 0,1, patrz (8.9) i (8.10)

$$A_{\text{nowe}} = A_{\text{stare}} + \text{mutacja}_A \quad (8.9)$$

$$B_{\text{nowe}} = B_{\text{stare}} + \text{mutacja}_B \quad (8.10)$$

- Selekcja:

- Selekcja zaczyna się od sortowania populacji (przy założeniu, że niższe wartości są lepsze).
- Losowanie jest proporcjonalne do pozycji osobnika w populacji - osobniki na lepszych pozycjach mają większe szanse na wybór (8.11).

$$P(i) = \frac{i}{\sum_{j=1}^n j} \quad (8.11)$$

gdzie $P(i)$ jest prawdopodobieństwem wyboru i -tego osobnika, a n to liczba osobników.

- Po selekcji populacja jest przycinana do maksymalnego rozmiaru.

- Zakończenie algorytmu:

- Algorytm kończy się, gdy najlepszy osobnik (po sortowaniu populacji) nie zmienił się i osiągnięto przynajmniej połowę maksymalnej liczby iteracji (500). Wartość najlepszego osobnika jest aktualizowana w tym kroku.

- Aktualizacja najlepszego rozwiązania:

- Po każdej iteracji najlepszy osobnik jest porównywany z poprzednim najlepszym osobnikiem. Jeśli obecny najlepszy osobnik jest lepszy, jest on zapisywany jako nowy najlepszy osobnik.

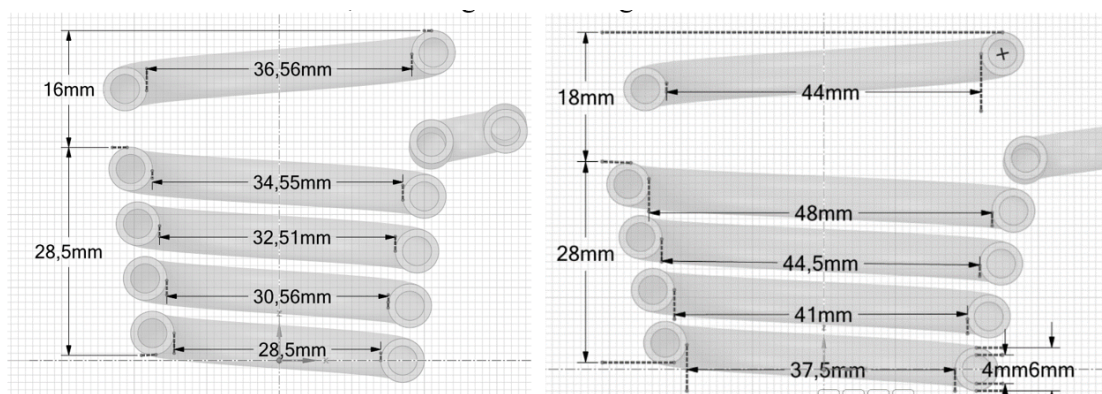
- Inne szczegóły implementacyjne:
 - W trakcie każdej iteracji populacja jest sortowana według jakości osobników (przy założeniu, że mniejsza wartość oznacza lepszą jakość).
 - Każdy osobnik posiada dwa parametry (A i B), które są modyfikowane podczas reprodukcji i mutacji. Odpowiadają one α i $r_{cBottom}$.

Te założenia definiują podstawowe operacje algorytmu ewolucyjnego, takie jak reprodukcja, mutacja, selekcja i warunki zakończenia, oraz określają sposób manipulacji populacją osobników w trakcie optymalizacji.

8.2.6 Wyniki optymalizacji wzbudnika dla stałego wsadu w kształcie kuli

W ramach sekcji 8.2 wykorzystano przygotowany i zwalidowany model obliczeniowy symulujący działanie wzbudnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego. W ramach przygotowania do optymalizacji wykonano próbkowanie przestrzeni rozwiązań na podstawie zmiany dwóch parametrów powiązanych z geometrią wzbudnika: kąta wierzchołka wzbudnika i jego dolnego promienia. Dodatkowym wyzwaniem było ustalenie dla każdej geometrii pozycji, w której wsad lewituje. Na podstawie przestrzeni rozwiązań dobrano strategię optymalizacji: algorytm ewolucyjny. Ze względu na długi czas obliczeń zaproponowano procedurę, w ramach której przygotowano aproksymowaną funkcję celu, której parametry zostały dobrane na podstawie wcześniejszego próbkowania przestrzeni rozwiązań. W każdej iteracji procesu optymalizacji aproksymowana funkcja celu była aktualizowana. Rezultatem optymalizacji jest nowa geometria wzbudnika przedstawiona na rysunku 8.14. Jako że wynik jest rezultatem przeszukiwania globalnego to rezultat może być rozwiązaniem suboptymalnym. Najważniejszą śledzoną charakterystyką jest sprawność procesu.

Dla rozwiązania początkowego wynosi ona 0,0034, natomiast po przeprowadzeniu optymalizacji nowa sprawność jest równa 0,0091. Uzyskane rozwiązanie jest więc prawie trzykrotnie lepsze pod kątem przyjętej funkcji celu.



Rysunek 8.14: Początkowe wymiary wzbudnika (po lewej) i wymiary po zakończeniu procesu optymalizacji (po prawej).

8.2.7 Wnioski z optymalizacji wzbudnika dla stałego wsadu w kształcie kuli

Na podstawie przedstawionych wyników można sformułować następujące wnioski:

- Zastosowany model obliczeniowy symulujący działanie wzbudnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego okazał się skuteczny, co pozwoliło na przeprowadzenie optymalizacji geometrii wzbudnika.
- Wybrana strategia optymalizacji, oparta na algorytmie ewolucyjnym, okazała się skuteczna. Pomimo długiego czasu obliczeń, zastosowanie aproksymowanej funkcji celu, która była aktualizowana w każdej iteracji, przyczyniło się do znacznej poprawy wyników.
- Wykorzystanie aproksymowanej funkcji celu pozwoliło na znaczną redukcję czasu obliczeń, co jest istotne w kontekście złożonych symulacji numerycznych. Aktualizacja tej funkcji w trakcie optymalizacji umożliwiła precyzyjniejsze dopasowanie modelu do rzeczywistych potrzeb optymalizacyjnych.
- Wynik optymalizacji wskazuje na trzykrotną poprawę sprawności procesu, co jest znaczącym osiągnięciem. Początkowa sprawność wynosiła 0,0034, a po optymalizacji wzrosła do 0,0091, co świadczy o skuteczności przeprowadzonych działań optymalizacyjnych. Ostateczna geometria wzbudnika, mimo że może być suboptymalna, stanowi istotną poprawę w stosunku do pierwotnej konfiguracji. Wzrost sprawności wskazuje na to, że przeprowadzone zmiany miały pozytywny wpływ na działanie wzbudnika.

Podsumowując, przeprowadzona optymalizacja pozwoliła na uzyskanie znaczącej poprawy parametrów działania wzbudnika, co potwierdza skuteczność zastosowanych metod oraz strategii optymalizacyjnych.

8.3 Eksperymentalne porównanie charakterystyk dla dwóch wybranych wzbudników do topienia lewitacyjnego

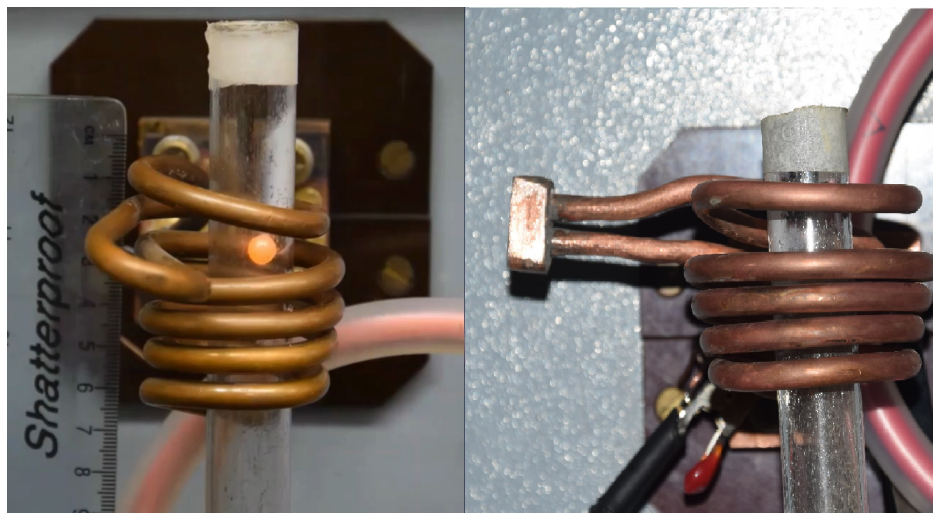
8.3.1 Opis problemu

Pomiary przeprowadzono na dwóch wzbudnikach do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego, z których pierwszy jest bazowym (dla którego przeprowadzono weryfikację pomiarową podczas przygotowania modelu), a drugi jest wynikiem poszukiwania najlepszych parametrów geometrycznych dla prezentowanej klasy wzbudników. Oba wzbudniki wykonane są z miedzianych rurek o promieniu wewnętrznym 4 mm i zewnętrznym 6 mm. Podczas eksperymentu woda przepływa wewnątrz rurki, aktywnie ją chłodząc. Wzbudnik jest podłączony do źródła prądu, które generuje prąd przemienny, którego parametry zależą od podłączonego wzbudnika i konfiguracji obwodu rezonansowego i po zmierzeniu zostały przedstawione w tabeli 8.4. Wewnątrz wzbudnika znajduje się aluminiowa kulka (wsad) o średnicy 6 mm. Aluminium zostało wybrane ze względu na stosunkowo niską temperaturę topienia i niewielką wagę, co jest powszechną praktyką wśród badaczy. Różnice między dwoma wzbudnikami pokazano na rysunku 8.14, Natomiast zdjęcie wzbudnika wyprodukowanego na podstawie geometrii uzyskanej w procesie optymalizacji można znaleźć po prawej stronie na rysunku 8.15.

Stanowisko pomiarowe i metodykę dokonywania pomiarów zostały opisane w rozdziale 6.

8.3.2 Wyniki pomiarów

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych na stanowisku badawczym. Tabela 8.4 przedstawia wartości parametrów prądowych dla obu wzbudników. Wartości podczas pracy pod obciążeniem i na biegu jałowym nie wykazują różnic większych niż dokładność pomiaru.



Rysunek 8.15: Po lewej stronie znajduje się bazowy wzбудnik, na podstawie którego przygotowano geometrie modelu wykorzystaną w sekcji 8.1. Natomiast po prawej stronie znajduje się wzbudnik wykonany na podstawie wyników procesu optymalizacji przedstawionej w sekcji 8.2.

Tabela 8.4: Parametry prądowe obu testowanych wzbudników.

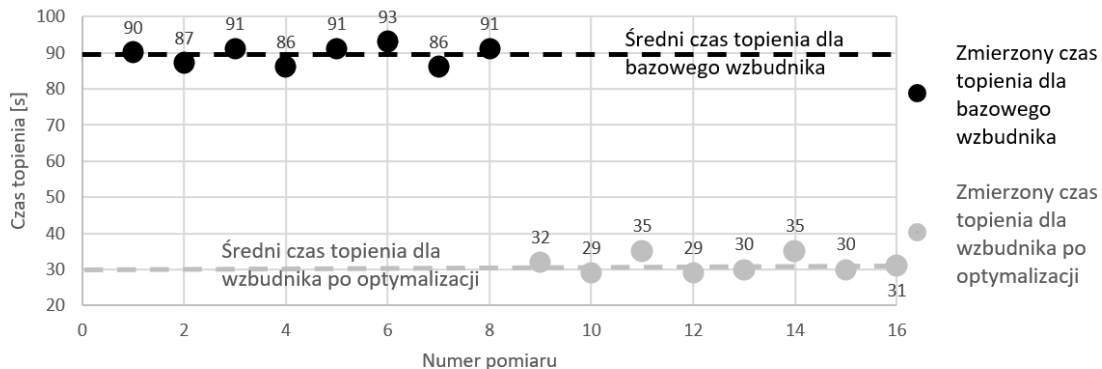
Parametr elektryczny	Wzbudnik bazowy	wzbudnik po optymalizacji
Natężenie (RMS)	364 A	359 A
Napięcie (RMS)	203 V	358 V
Częstotliwość	277 777 Hz	246 154 Hz
Przesunięcie fazowe	87,56	88,62
Moc czynna	3145,816 W	3095,223 W

Rysunek 8.16 przedstawia pomiary wysokości lewitacji wsadu dla obu cewek indukcyjnych. Kolor czarny oznacza pomiary wykonane dla bazowego wzbudnika, a kolor szary oznacza pomiary dla zoptymalizowanego wzbudnika. Przerywane linie wskazują średnią wartość dla kategorii pomiarów w odpowiednim kolorze.



Rysunek 8.16: Pozycja lewitacji wsadu podczas procesu.

Rysunek 8.17 przedstawia wyniki pomiarów czasu potrzebnego do stopienia wsadu od momentu jego wprowadzenia do wnętrza wzbudnika do momentu zarejestrowania temperatury 660°C przez kamerę termowizyjną. Kolorem czarnym zaznaczono pomiary przeprowadzone dla wzbudnika bazowego, a kolorem szarym pomiary dla zoptymalizowanego wzbudnika. Przerwane linie wskazują średnią wartość dla kategorii pomiarów w odpowiednim kolorze.



Rysunek 8.17: Czas topienia wsadu.

8.3.3 Wnioski z porównania charakterystyki obu wzbudników

Z przedstawionych pomiarów wynika, że charakterystyki prądowe przy tym samym źródle zasilania dla zoptymalizowanego wzbudnika różnią się znacząco od charakterystyk wzbudnika podstawowego. Natężenie prądu jest niższe dla zoptymalizowanego wzbudnika o 5 A. Różnica w częstotliwości prądu wynosi $31\,623\text{ Hz}$. Częstotliwość prądu jest niższa dla zoptymalizowanego wzbudnika.

Obserwacje zachowania wsadu, w tym jego położenia i czasu nagrzewania, dostarczają informacji na temat właściwości procesu. W przypadku podstawowego wzbudnika średnia pozycja podczas lewitacji jest wyższa niż w przypadku zoptymalizowanego wzbudnika. Ponadto średni czas topienia dla zoptymalizowanego wzbudnika jest krótszy o 60 sekund. Biorąc pod uwagę, że efektywna moc jest porównywalna dla obydwóch wariantów, zalecamy stosowanie zoptymalizowanego wzbudnika do celów komercyjnych.

8.4 Wykorzystanie tytanowego wsadu w ETL

8.4.1 Opis problemu

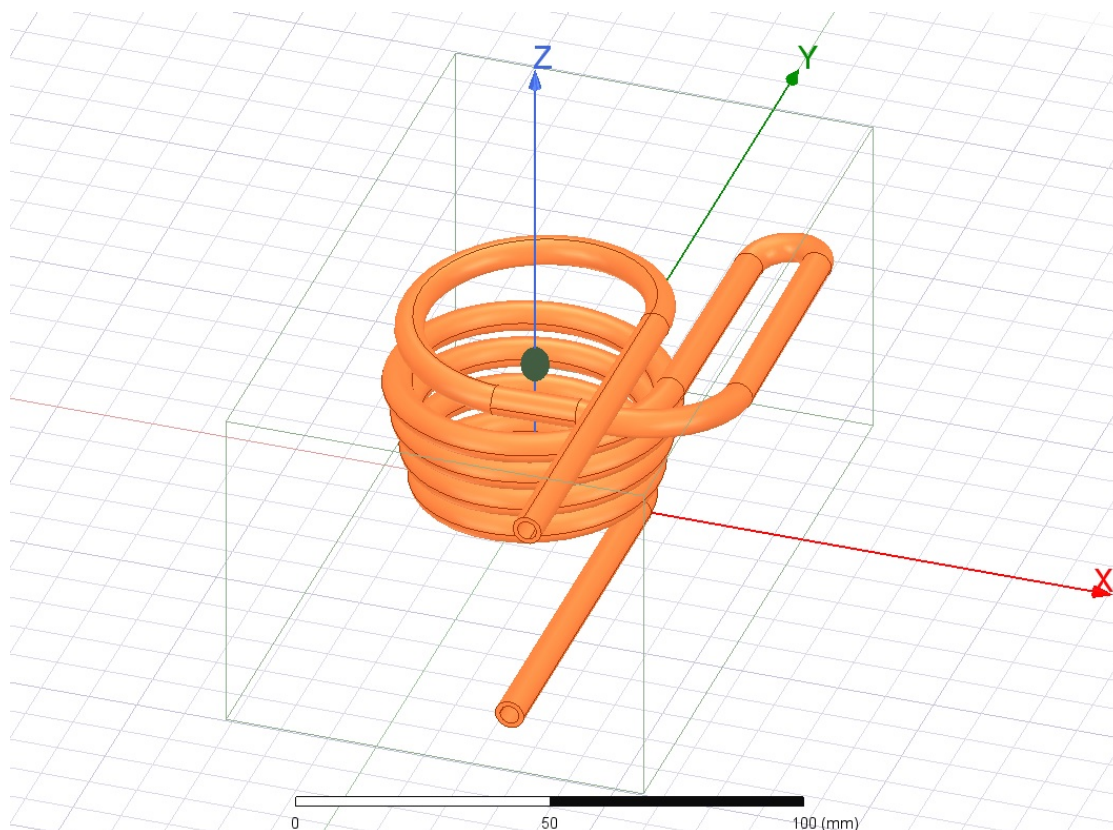
Dotychczasowe symulacje i eksperymenty opierały się o wsad aluminiowy. Aluminium ma stosunkowo niską gęstość i temperaturę topienia, co pozwala na stosunkowo łatwe uzyskanie zamierzonego efektu, czyli przejście do fazy ciekłej w warunkach lewitacji.

Jednak w zastosowaniach przemysłowych, ETL jest raczej niewykorzystywany do topienia aluminium. Stosuje się go raczej do topienia niobu, molibdenu, tantalu, wolframu i renu, a także tytanu, wanadu, chromu, manganu, cyrkonu, rutenu, rodu, hafnu, osmu i irydu [59, 82]. Aby pokazać możliwość zastosowania rozważanych rozwiązań w przemyśle w ramach tej sekcji będzie rozważane topienie wsadu tytanowego.

Topienie tytanu będzie rozważane z użyciem modelu przedstawionego w 5.3, geometria wzbudnika jest przedstawiona na rysunku 8.18. Wsad będzie kulisty, i wykonany z tytanu, a jego właściwości będą zgodne z tabelą 8.4. Dodatkowo, właściwości materiału zmieniają się wraz ze wzrostem temperatury zgodnie z równaniami zapisanymi w bibliotece materiałowej Ansysa [1] dla tego typu materiału.

Tabela 8.5: Właściwości tytanowego wsadu użytego w symulacji.

Promień wsadu	1,922 mm
Materiał	Tytan
Gęstość	4510 kg/m^3
Ciepło właściwe	521,646 $J/(kg * C^\circ)$
Przewodność cieplna	196391 $W/(m^2 * C^\circ)$



Rysunek 8.18: Geometria wzbudnika do topienia zdeformowanego wsadu.

8.4.2 Wyniki analizy pozycji wsadu oraz natężenia prądu

Ze względu na zmianę parametrów geometrycznych i materiałowych wsadu trzeba na nowo wyznaczyć pozycję, w której następuje lewitacja wsadu. Wstępne symulacje wskazują, że prąd o natężeniu 300 A (tabela 8.6) jest niewystarczający, aby wygenerować siłę wznoszącą potrzebną do utrzymania wsadu w warunkach lewitacji. Nie jest to zaskakujące, ponieważ nowo użyty wsad ma wyższą gęstość niż aluminium, co oznacza większy ciężar przy podobnej objętości. Siła grawitacji działająca na wsad wynosi 0,001323 N.

W związku z tym przeprowadzono przegląd obszaru rozwiązań dla różnych natężeń prądu i różnych pozycji wsadu. W pierwszym kroku dokonano obliczeń dwuwymiarowych dla natężenia prądu w zakresie od 300 do 1100 A z krokiem 200 A oraz dla pozycji wertykalnej wsadu od 15 do 30 mm z krokiem 3 mm. Na tej podstawie stwierdzono, że maksymalna siła wznoszenia występuje w okolicach pozycji 24 mm, a minimalne wymagane natężenie prądu znajduje się w przedziale od 700 do 900 A.

Następnie przeprowadzono ponowne obliczenia dwuwymiarowe z zawężonymi granicami przedziałów. Natężenie prądu zmieniało się od 720 do 880 A z krokiem 20 A, natomiast pozycja wsadu mieściła się w granicach od 21 do 27 mm z krokiem 3 mm. Na tej podstawie stwierdzono, że minimalne potrzebne natężenie wynosi 760 A, a wsad powinien lewitować na wysokości około 24 mm.

Obliczenia dwuwymiarowe można by kontynuować, zawężając granice obszaru rozwiązań i zmniejszając krok. Jednak należy pamiętać, że wsad podczas procesu może oscylovac. Przy zbyt małym zakresie pozycji, dla których siła wznosząca jest większa od ciężaru wsadu, może dojść do wypadnięcia wsadu ze wzbudnika. Dlatego postanowiono uznać powyższe parametry za wystarczające do dalszych rozważań. Wyniki obliczeń dwuwymiarowych zebrano w tabeli 8.6.

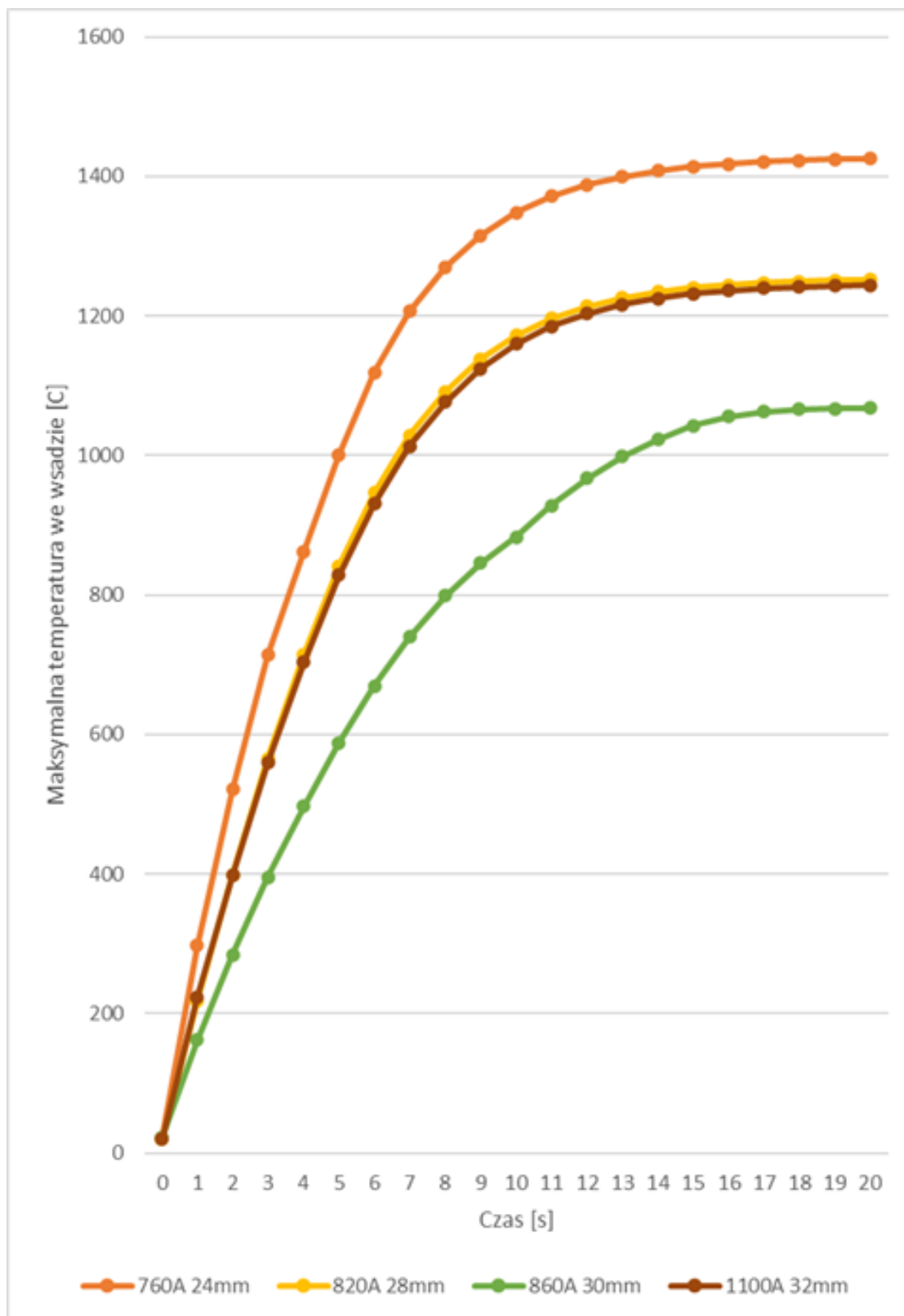
Tabela 8.6: Przegląd przestrzeni rozwiązań dla różnych wartości natężenia prądu i wertykalnej pozycji wsadu. Kolor zielony oznacza wartość siły wznoszącej [N] dla danego układu, natomiast czerwoną czcionką oznaczono warianty, dla których wsad nie lewituje. Na niebiesko zaznaczono komórkę, w której znajduje się pozycja najbliższa stabilnej pozycji lewitacji dla najniższego natężenia prądu.

		Pozycja wsadu [mm]					
		15	18	21	24	27	30
Natężenie prądu [A]	300	0,00013	0,00019	0,00021	0,000212	0,000194	0,000161
	500	0,00037	0,00051	0,00058	0,000589	0,00054	0,000448
	700	0,00073	0,00101	0,00114	0,001155	0,001058	0,000878
	720			0,001204	0,001222	0,001119	
	740			0,001271	0,001291	0,001182	
	760			0,001341	0,001362	0,001247	
	780			0,001413	0,001434	0,001313	
	800			0,001486	0,001509	0,001381	
	820			0,001561	0,001585	0,001451	
	840			0,001638	0,001664	0,001523	
	860			0,001717	0,001744	0,001596	
	880			0,001798	0,001826	0,001671	
	900	0,0012	0,00167	0,00188	0,00191	0,001748	0,001452
	1100	0,00179	0,00249	0,00281	0,002853	0,002611	0,002169

8.4.3 Wyniki analizy termicznej wsadu

Dla natężeń prądu: 760, 820, 860 i 1100 [A] i odpowiadającym im pozycjom stabilnej lewitacji przeprowadzono symulacje rozkładu pola temperatury we wsadzie i je-

go bezpośrednim otoczeniu zgodnie z 5.3.5. Obliczenia były prowadzone w przedziale czasowym od 0 do 20 s z krokiem 1 s. Wyniki były zapisywane co 1 krok i zostały przedstawione na wykresie 8.19. Jak Można zauważyć, żadna z rozważanych kombinacji i pozwala osiągnąć temperatury topienia. Najwyższa wartość temperatury jest osiągana dla 760 A, najprawdopodobniej ze względu na stosunkowo niską pozycję lewitacji wsadu. Dla wyższych natężeń rośnie również wysokość, na której wsad lewituje, co wiąże się ze spadkiem maksymalnej temperatury, jaką osiąga wsad.



Rysunek 8.19: Maksymalna temperatura wsadu w funkcji czasu dla wsadu w pozycji równowagi dla różnych natężeń prądu.

8.4.4 Wnioski związane z wykorzystaniem tytanowego wsadu

W ramach tej sekcji przeprowadzono analizę możliwości zastosowania zoptymalizowanego wzbudnika, powstałego na podstawie sekcji 8.2, do topienia tytanu. Przeprowadzono analizę dwuparametrową dla różnych wartości natężenia w zakresie [300, 1100] A i położenia wsadu w przedziale [15, 30] mm. Na tej podstawie przeprowadzono analizę termiczną topienia tytanowego wsadu.

Wnioski można zawrzeć w następujących podpunktach:

- Najniższym natężeniem prądu, dla którego wsad może stabilnie lewitować, jest 760 A przy położeniu wertykalnym 24 mm.
- Dla zestawienia parametrów (760 A i 24 mm) nie da się uzyskać temperatury topienia, ponieważ temperatura wsadu stabilizuje się w okolicach 1427 °C.
- Dla pozostałych rozważanych natężeń prądu uzyskano temperatury niższe niż 1427 °C.

To, że wsad dla rozważanej geometrii wzbudnika nie osiąga temperatury topienia dla tytanu, może być spowodowane tym, że obecny wzbudnik był optymalizowany, dla innej geometrii i materiału wsadu.

Rozdział 9

Badania EM-T-FD

9.1 Modelowanie deformacji wsadu

9.1.1 Opis problemu

Podczas eksperymentów ze wzбудnikiem o geometrii opracowanej na podstawie sekcji 8.2, dla wsadu aluminiowego o promieniu 3 mm, który osiągnął temperaturę topnienia, zaobserwowano jego deformację 9.1. Wynika to ze zmiany stanu skupienia wsadu. Nowa geometria jest rezultatem działania siły elektrodynamicznej oraz właściwości stopionego materiału.



Rysunek 9.1: Geometria wsadu po przekroczeniu temperatury topnienia dla 650 A.

Do symulacji użyto modelu przedstawionego w sekcji 5.4. Dla submodelu elektromagnetycznego wykorzystano geometrię wzbudnika i wsadu, opracowaną na podstawie sekcji 8.2. Dla roztopionego aluminium przyjęto parametry przedstawione w tabeli 9.1.

Tabela 9.1: Parametry materiałowe dla ciekłego aluminium.

Parametr	Wartość
Gęstość	2380 kg/m ³
Napięcie powierzchniowe	0,94 N/m
Konduktywność	3,8 MS/m

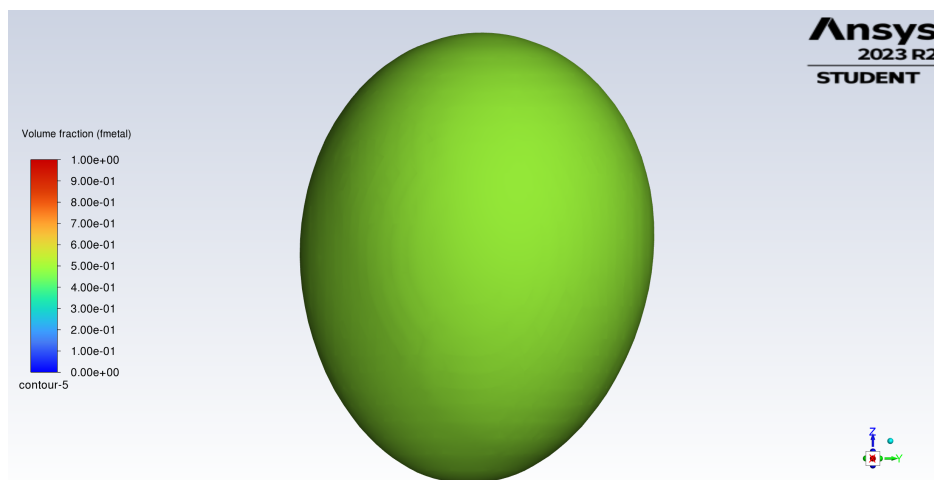
Dla częstotliwości 277 777 Hz wymagana jest stosunkowo gęsta siatka dyskretyzacyjna, wynikająca z niewielkiej głębokości wnikania pola, która powinna być mniejsza niż 0,0005 mm dla obszaru, w którym symulujemy stopiony wsad. Biorąc pod uwagę, że obszar, w którym spodziewamy się występowania stopionego wsadu, jest stosunkowo niewielki w porównaniu z całym obszarem wewnątrz cewki, takie założenie jest akceptowalne z punktu widzenia czasu obliczeń. Do implementacji algorytmu przedstawionego na rysunku 5.15 wykorzystano parametry przedstawione w tabeli 9.2.

Tabela 9.2: Parametry modelu EM

Parametr	Wartość
Liczba czworościanów siatki 3D	800 000
Rozmiar elementu siatki strefy dużej gęstości	0,00013 m
Głębokość i szerokość strefy o dużej gęstości	0,013 m
Wysokość strefy o dużej gęstości	0,026 m
Krok czasu symulacji	0,01 s
Natężenie prądu	650 A
Częstotliwość prądu	277 777 Hz

9.1.2 Wyniki symulacji

Rezultatem symulacji jest nowa geometria wsadu, która odzwierciedla kształt zarejestrowany podczas eksperymentu. Wyniki symulacji można zobaczyć na obrazie 9.2. Zgodność tych wyników z obserwacjami dokonanymi podczas eksperymentów 9.1 jest oceniana przez badaczy jako dobra. Wystąpienie stosunkowo małych różnic w geometrii wsadu jest spodziewane ze względu na uproszczenia, które zawsze występują podczas tworzenia modelu.



Rysunek 9.2: Geometria wsadu dla wyników symulacji.

Korzystając z modelu obliczeniowego, można analizować zjawiska niewidoczne podczas eksperymentu. Jednym z nich jest rozkład siły elektrodynamicznej. Na tej podstawie można zaobserwować zanik sił w osi obciążenia wsadu, co powoduje, że centralny obszar jest podtrzymywany jedynie przez siły napięcia powierzchniowego. Tłumaczy to, dlaczego ETL jest stosowany głównie do wsadów o małych rozmiarach. Rezultatem oddziaływania sił na objętość wsadu jest mieszanie elektromagnetyczne, charakterystyczne dla procesu ETL. Uzyskane prędkości przepływów są stosunkowo małe, co wynika z niewielkiego rozmiaru wsadu.

9.1.3 Wnioski z modelowania deformacji wsadu

W ramach przedstawionych badań zaprezentowano wyniki symulacji wsadu po osiągnięciu temperatury topienia. Symulacja jest oparta na modelu przedstawionym w sekcji 5.4. Dzięki zastosowaniu stałego stosunkowo niewielkiego obszaru, z podwyższonym zagęszczeniem siatki udało się osiągnąć czas pojedynczego cyklu obliczeń przedstawionego na rysunku 5.13 nawet na poziomie 80 sekund.

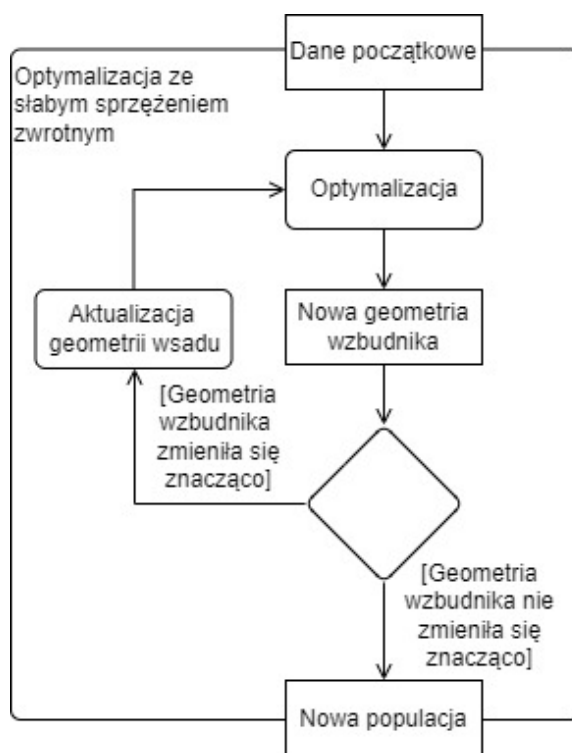
Symulacja geometrii wsadu pozwala na odzwierciedlenie geometrii zaobserwowanej podczas eksperymentów. Jednocześnie model umożliwia obserwowanie wielkości niewidocznych lub trudnych do zaobserwowania podczas eksperymentu, takich jak: rozkład sił elektrodynamicznych i ciepło Joule'a.

9.2 Optymalizacja geometrii wzbudnika dla wsadu po stopieniu

9.2.1 Opis problemu

W rozdziale 8.2 jednym z założeń była kulistość topionego wsadu. Jest to użyteczne jeżeli ważne jest tylko doprowadzenie wsadu do temperatury topienia. Jednak jeżeli istotne jest utrzymanie wsadu w fazie ciekłej, np. ze względu na proces mieszania elektromagnetycznego to może być to niewystarczające. W tym celu należy sprawdzić, czy uzyskana w wyniku optymalizacji geometria wzbudnika dla niestopionego wsadu zmieni się, jeżeli w procesie optymalizacji uwzględnimy deformacje wsadu.

Na rysunku 9.2 przedstawiono wynik obliczeń cyklicznie połączonych modeli: elektromagnetycznego i dynamiki płynów. Jak można zauważyć uzyskana geometria wsadu odpowiada zaobserwowanym odkształceniom 9.1. Obliczenia wykonane dla sprzężonych modeli pochłaniają dużą ilość zasobów, co skutkuje długim czasem obliczeń. Pojedyncze rozwiązanie modelu elektromagnetycznego dla zdeformowanego wsadu 5.3 zajmuje około 130 minut, natomiast rozwiązanie modelu elektromagnetycznego z dynamiką płynów 5.4 zajmuje około 12 godzin. W związku z potrzebą wielokrotnej iteracji programu całość zajęłaby zbyt dużą ilość zasobów w stosunku do możliwości badaczy. Z tego powodu zostanie wykorzystane słabe sprzężenie z modelem dynamiki płynów. Oznacza to, że geometria wsadu będzie wyznaczana przed rozpoczęciem optymalizacji i dla najlepszego znalezionej wariantu. Jeżeli różnicę w geometrii dla poszczególnych wariantów nie będą się znacząco między sobą różnić, to model dynamiki płynów nie będzie ponownie symulowany. Znaczna różnica będzie rozumiana jako różnica większa niż 10% dla dowolnego parametru. Schemat optymalizacji ze słabym sprzężeniem zwrotnym został przedstawiony na rysunku 9.3. Znajomość geometrii wsadu po stopieniu pozwoli na bardziej precyzyjną analizę elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego.



Rysunek 9.3: Proces optymalizacji ze słabym sprzężeniem zwrotnym.

9.2.2 Funkcja celu, zmienne i ograniczenia

Celem optymalizacji jest maksymalizacja sprawności procesu rozumianą jako stosunek mocy czynnej we wsadzie do mocy czynnej w całym układzie (3.1).

Żeby móc porównywać wyniki obydwóch optymalizacji zmienne modelu są dobrane analogicznie do sekcji 8.2.2 na Rys. 8.9. Ich znaczenie nie uległo zmianie:

- α - kąt nachylenia wzbudnika,
- $r_{cBottom}$ - dolny promień wzbudnika,
- z_{batch} - położenie wsadu wewnątrz wzbudnika. Parametr ten nie jest optymalizowany, ale ma wartość, dla której siła elektrodynamiczna równoważy siłę grawitacji.

Ograniczenia również sobie odpowiadają. Założono, że istotne są pozycje stabilnej lewitacji wewnątrz wzbudnika (9.1). Dodatkowo sam wzbudnik powinien mieć promień nie mniejszy niż trzykrotność początkowego promienia wsadu przed stopieniem (9.2),

a jego zwoje powinny się rozszerzać w zwrocie ku górze (9.3). Prąd płynący przez wzbudnik będzie miał stałe parametry zgodne z tymi przedstawionymi w rozdziale 9.1.

$$0 < z_{batch} < h_{inductor} \quad (9.1)$$

$$r_{cBottom} > 3 \cdot r_{batch} \quad (9.2)$$

$$\alpha > 0 \quad (9.3)$$

gdzie:

- $h_{inductor}$ - wysokość wzbudnika,
- r_{batch} - promień wsadu,

9.2.3 Próbkowanie przestrzeni rozwiązań

Pierwszym krokiem jest zbadanie, w jaki sposób kształtuje się przestrzeń rozwiązań. Zbadano zmienność sprawności procesu i pozycje lewitacji wsadu w następujących przedziałach:

- dolny promień wzbudnika ($r_{cBottom}$) w zakresie $< 18; 27 >$ mm,
- kąt wierzchołka wzbudnika (α) w zakresie $< 0,02; 0,06 >$.

Wyniki próbkowania przestrzeni rozwiązań zostały przedstawione w tabeli 9.3.

Na podstawie tabeli 9.3 można stwierdzić, że przestrzeń rozwiązań posiada więcej niż jedno ekstremum lokalne. Z tego względu wykorzystywany do tej pory algorytm optymalizacyjny przedstawiony w sekcji 8.2.5 powinien być również odpowiedni dla rozważanego w tym rozdziale problemu. Rozwiązania uzyskane za pomocą obliczeń wielowariantowych będą stanowiły populację początkową w algorytmie ewolucyjnym.

9.2.4 Optymalizacja wzbudnika dla wsadu w stanie ciekłym

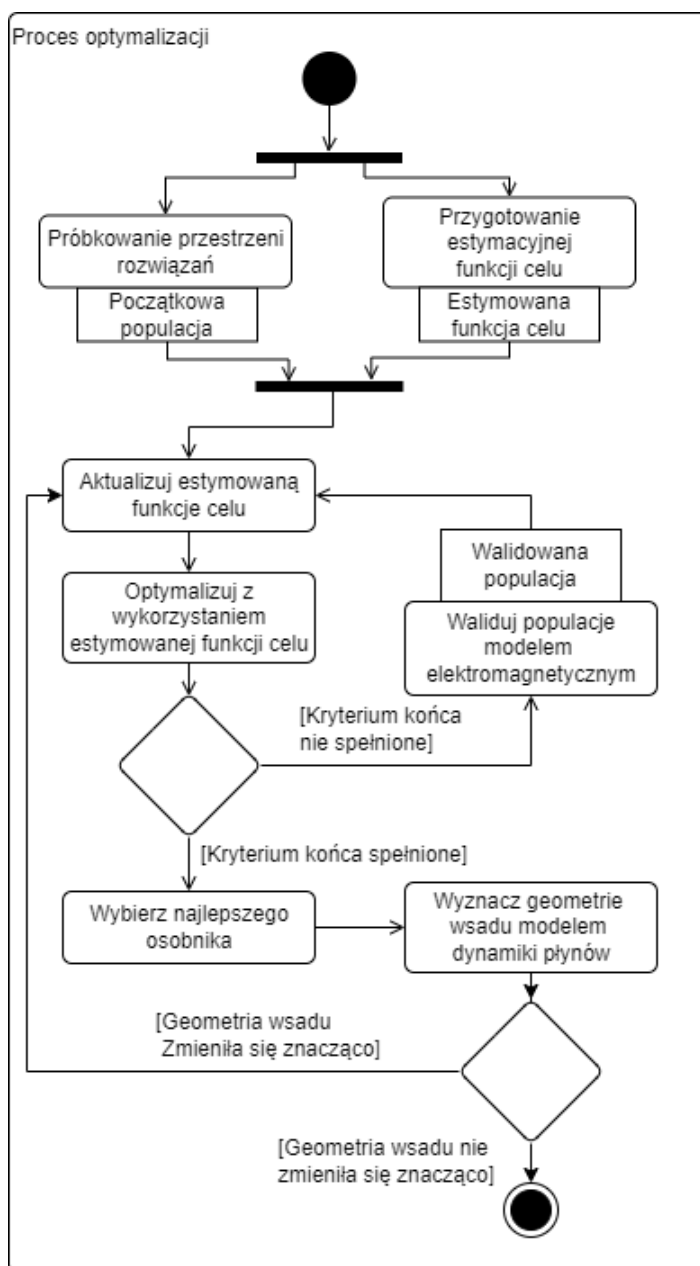
Początkowa geometria wsadu została przedstawiona w sekcji 9.1 i jest przedstawiona na rysunku 9.2. Będzie ona pierwszą geometrią wsadu wykorzystywaną podczas

Tabela 9.3: Sprawność procesu dla obliczeń wielowariantowych. Na niebiesko zaznaczono optima lokalne.

		Promień [mm]						
		18	19	20	21	22	23	24
Kąt	0,20			0,00267		0,00312		0,00442
	0,25				0,00276	0,00405	0,00421	0,00443
	0,30	0,00298		0,00326	0,00350	0,00324	0,00451	0,00533
	0,35				0,00384	0,00377	0,00388	0,00523
	0,40	0,00312		0,00431	0,00357	0,00436	0,00477	0,00483
	0,45				0,00350	0,00418	0,00449	0,00476
	0,50	0,00060		0,00342		0,00413		0,00393

optymalizacji. Pierwszą geometrią wzbudnika jest wynik procesu optymalizacji dla kulistego wsadu przedstawiony po prawej stronie na rysunku 8.14.

Czas potrzebny na rozwiązanie pojedynczej symulacji jest stosunkowo długi, z tego powodu przygotowano estymowaną funkcję celu, której parametry są dobrane na podstawie próbek z przestrzeni rozwiązań z użyciem metody najmniejszych kwadratów. Dodatkowo parametry estymowanej funkcji celu są aktualizowane pomiędzy optymalizacjami z użyciem przeszukiwania globalnego. W sposób schematyczny zostało to przedstawione na rysunku 9.4. Warunkiem zakończenia całego procesu optymalizacji jest zadana liczba iteracji bez znaczącej poprawy uzyskanego wyniku i brak istotnych zmian w sprawności procesu po zmianie geometrii wsadu.



Rysunek 9.4: Schemat blokowy procesu optymalizacji dla obliczeń EM-T-FD.

Algorytm ewolucyjny jest taki sam jak dla wsadu kulistego i został przedstawiony w rozdziale 8.2.5. Schemat algorytmu przeszukiwania globalnego znajduje się na rysunku 8.13. Pseudokod implementacji algorytmu ewolucyjnego znajduje się w załączniku A.

9.2.5 Metodyka optymalizacji

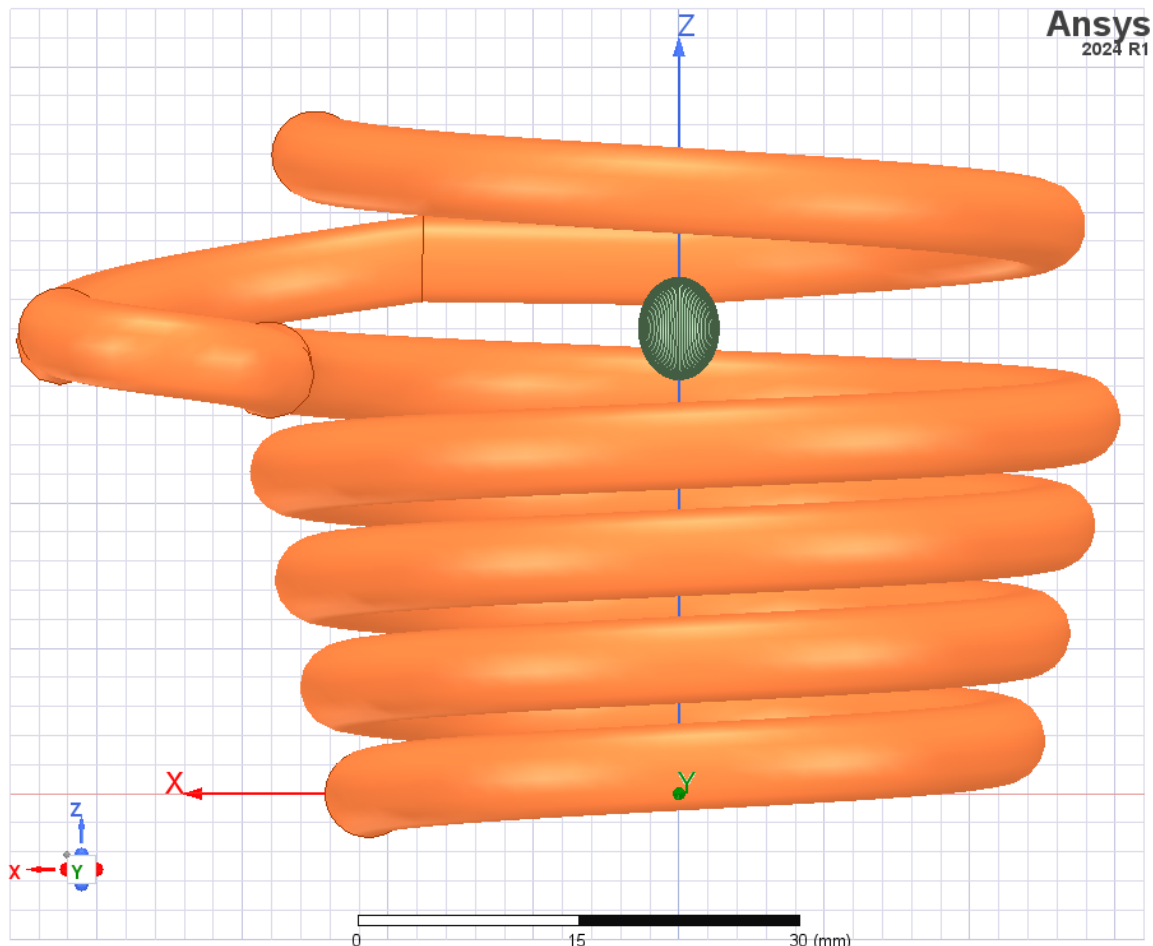
Dla problemów optymalizacyjnych, w których obliczenia dla jednego zestawu parametrów zajmują zbyt dużo czasu, proponuje się zastosowanie metodyki optymalizacyjnej pokazanej na rysunku 8.12. Jego użyteczność została potwierdzona poprzez pomiary porównawcze, których wyniki znajdują się w rozdziale 8.3. W tym rozdziale jest zaproponowane jej rozwinięcie, które w porównaniu do poprzedniego obejmuje również słabe sprzężenie zwrotne z dynamiką płynów. Nową metodykę przedstawiono na rysunku 9.4 i obejmuje ona:

1. Próbkowanie przestrzeni rozwiązań w celu wybrania odpowiedniego algorytmu optymalizacyjnego. Jeżeli potwierdzono istnienie więcej niż jednego optimum lokalnego, to znaczy, że metodyka powinna być kontynuowana z użyciem przeszukiwania globalnego. W przeciwnym razie przeszukiwanie lokalne powinno być wystarczające. Dodatkowo uzyskane wyniki stanowią pierwszą populację, która może zostać wykorzystana przez algorytm przeszukiwania globalnego.
2. Równoległe jest przygotowana estymacyjna funkcja celu, która służy do zastępowania czasochłonnych obliczeń na prawdziwych obiektach optymalizacji.
3. Parametry estymowanej funkcji celu są aktualizowane w każdej iteracji na podstawie wszystkich znanych wyników obliczeń wykonanych na oryginalnym obiekcie, w tym przypadku na modelu symulacyjnym.
4. Następnie jest przeprowadzana optymalizacja, która wykorzystuje estymowaną funkcję celu w miejscu modelu symulacyjnego. Wynikiem tego kroku jest populacja składająca się z najbardziej obiecującego wyniku i pięciu innych, które zostały wylosowane z prawdopodobieństwem wprost proporcjonalnym do ich jakości (najwyższe wyniki mają największą szansę na wylosowanie).
5. Jeżeli w zadanej liczbie iteracji całego algorytmu nie znaleziono lepszego rozwiązania od dotychczas najlepszego, przejdź do punktu 7. W przeciwnym wypadku przejdź do punktu 6.
6. Dokonaj symulacji dla populacji, która została wybrana na podstawie optymalizacji estymowanej funkcji celu. Wyniki dodaj do zbioru "walidowana populacja", który będzie potrzebny do aktualizacji parametrów estymowanej funkcji celu. Przejdź do punktu 3.

7. Dla najlepszego zwalidowanego osobnika uruchom model dynamiki płynów i sprawdź, czy geometria wsadu zmieniała się znacząco. Jeżeli tak się stało, to wróć do punktu 3, a w przeciwnym przypadku zakończ proces optymalizacji.

9.2.6 Wyniki optymalizacji wzbudnika dla wsadu w stanie ciekłym

Podczas procesu optymalizacji nie udało się znaleźć geometrii, która zapewniłaby wyższą sprawność procesu niż geometria początkowa. Rysunek 9.5 przedstawia geometrię, która wykazuje najwyższą sprawność jednakowo dla wsadu w kształcie kuli jak i wsadu po stopieniu. jego wymiary znajdują się po prawej stronie na rysunku 8.14.



Rysunek 9.5: Geometria uzyskana w wyniku optymalizacji.

Sprawność procesu dla wybranej geometrii wynosi 0,0058, jest więc ona o 0,0033

mniejsza od sprawności dla wsadu kulistego. Z kolei położenie wsadu jest niższe o 2 mm, zmniejszyło się więc z 30 do 28 mm. Różnice mogą być spowodowane wydłużeniem się wsadu w kierunku wertykalnym, a co za tym idzie zmniejszeniem promienia w płaszczyźnie horyzontalnej, czyli zwiększenie odległości próbki od zwojów wzbudnika.

Drugim rezultatem jest opracowanie metodyki optymalizacyjnej ze słabym sprzężeniem zwrotnym z dynamiką płynów. Proponowana metodyka może być wykorzystywana dla innych problemów, które charakteryzują się kosztownym (pod względem czasu lub zasobów) obiektem optymalizacji i wymagają sprzężenia zwrotnego z modelem, który jest jeszcze bardziej kosztowny obliczeniowo.

9.2.7 Wnioski z optymalizacji wzbudnika dla wsadu w stanie ciekłym

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że do rozwiązania tego problemu była wystarczająca metodyka przedstawiona w rozdziale 8.2. Jest to jednak możliwe do stwierdzenia dopiero po zakończeniu eksperymentu, ponieważ w literaturze brakuje badań zestawiających optymalizacje wsadu przed i po osiągnięciu temperatury topienia.

Drugą obserwacją jest spadek efektywności procesu po osiągnięciu temperatury topienia. Może być to spowodowane wertykalnym wydłużeniem się wsadu, a co za tym idzie oddalenie się od zwojów. Dodatkowo może z tego wynikać obniżenie pozycji lewitacji wsadu.

Pokrycie się suboptymalnej geometrii wzbudnika przed i po stopieniu wsadu jest zjawiskiem korzystnym. Modyfikacja geometrii wzbudnika w trakcie jego pracy komplikowałaby proces ETL.

Rozdział 10

Podsumowanie

Obiektem pracy jest jedna z technik topienia metali: Elektromagnetyczne Topienie Lewitacyjne. Mimo że ta technika rozwijana jest od połowy ubiegłego wieku, nadal istnieje potencjał do dalszego rozwoju w tej dziedzinie. Postęp technologiczny otwiera przed nami coraz to nowe możliwości. Zastosowanie zaawansowanych narzędzi cyfrowych pozwala na swobodne modyfikowanie parametrów procesu, jednocześnie potwierdzając ich zgodność z rzeczywistością.

Celem pracy jest opracowanie metodyki optymalizacji i jej walidacja dla wybranego modelu wzbudnika do lewitacji elektromagnetycznej. W ramach tej pracy przedstawiono metodykę optymalizacji. Jej pierwsza wersja jest przeznaczona dla problemów obliczeniowych posiadających bardzo kosztowne w obliczeniach obiekty. Została ona przedstawiona w sekcji 8.2.4. Ta metodyka jest sugerowana do użycia w sytuacjach kiedy posiadamy więcej niż jedno optimum lokalne, ponieważ została sprzęgnięta z algorytmem ewolucyjnym opisanym szczegółowo w 8.2.5. Rozwinięcie tej metodyki można znaleźć w sekcji 9.2.5 dodaje ono słabe sprzężenie zwrotne z dynamiką płynów, co pozwala na rozpatrywanie scenariusza, w którym wsad posiada temperaturę powyżej temperatury topienia i ulega deformacji. Ze względu na to, że podstawowa metodyka i jej rozwinięcie doprowadziły do tej samej geometrii wzbudnika, weryfikacja rezultatów znajduje się w jednym rozdziale 8.3.

W ramach zakresu pracy zrealizowano:

- W rozdziale 7 przeprowadzono wielowariantowe obliczenia dla modelu topienia lewitacyjnego, zadanej klasy wzbudników. W tym celu został przygotowany model symulacyjny, dla którego przeprowadzone obliczenia. W eksperymencie zmieniano

trzy parametry: kąt nawinięcia wzbudnika (α), częstotliwość prądu (f) oraz pionowe położenie wsadu (z_B). Następnie kontrolowano siły działające na wsad, moc indukowaną we wsadzie oraz moc dostarczaną do wzbudnika. Na tej podstawie wybrano najbardziej obiecujący wariant i zbadano zależności pomiędzy sprawnością procesu i siłą wznoszącą a kontrolowanymi parametrami geometrycznymi i prądowymi.

W tej części pracy uzyskano następujące wyniki:

- Maksymalna sprawność procesu topienia, w której występuje lewitacja wynosi 0,0162 i występuje dla częstotliwości $f = 10$ kHz, kąta nawinięcia wzbudnika $\alpha = \frac{2\Pi}{32}$ i pozycji wsadu $z_B = 0,03$ m.
- Składowa pionowa (F_z) siły przyłożonej do wsadu osiąga maksimum dla $f = 30$ kHz, $\alpha = \frac{3\Pi}{32}$ i $z_B = 0,035$ m.
- Największą sprawność procesu topienia osiągnięto dla $f = 10$ kHz, $\alpha = \frac{2\Pi}{32}$ i $z_B = 0,015$ m, mimo że wsad w tym położeniu nie lewituje.
- Moc indukowana we wsadzie (P_B) jest maksymalna dla częstotliwości $f = 35$ kHz, $\alpha = \frac{2\Pi}{32}$ i $z_B = 0,01$ m, jednak wsad nie lewituje.
- Maksimum całkowitej mocy dostarczonej do układu (P_T) uzyskano dla częstotliwości $f = 35$ kHz, $\alpha = \frac{6\Pi}{32}$ i $z_B = 0,04$ m, jednak lewitacja nie występuje.
- Potwierdzono stopienie wsadu dla wybranego wariantu (dla zwiększonego prądu wzbudnika).

Na tej podstawie wyciągnięto poniższe wnioski:

- Zgodnie z wynikami uzyskanymi dla wszystkich rozważanych wariantów, w przestrzeni rozwiązań nie znaleziono lokalnych ekstremów.
- Twardy warunek lewitacji wsadu pozwala na zastosowanie przybliżonych ograniczeń na parametry modelu zmniejszających rozmiar przestrzeni rozwiązań. Stwierdzono, że f musi być większe od 5 kHz, dodatkowo:
 - * Jeżeli f jest równe 15 kHz to α powinna być mniejsza od $\frac{6\pi}{32}$.
 - * W przypadku częstotliwości 10 kHz, wartość współczynnika α powinna być mniejsza niż $\frac{5\pi}{32}$, a położenie wsadu powinno być większe niż 0,02 m.
 - * Przy częstotliwości 25 kHz z_B powinno być większe od 0,01 m.

- Kolejnym etapem badań, przedstawionym w rozdziale 8.1, było uzupełnienie modelu EM o człon obliczeń cieplnych. Żeby potwierdzić wiarygodność modelu, została przygotowana procedura walidacji pomiarowej, która obejmowała dokonanie pomiarów z użyciem przygotowanego stanowiska pomiarowego przedstawionego w rozdziale 6. Po potwierdzeniu zadowalającej zgodności pomiędzy pomiarami a wynikami symulacji model obliczeniowy został uznany za wiarygodny.

Na podstawie tej części zebrano poniższe wyniki:

- Symulowany czas topienia wynosi 86 s, czyli 5 s szybciej niż mediana zmierzzonego czasu.
- Lewitacja wsadu występuje w pozycji 30 mm, czyli 2 mm niżej w porównaniu do pomiarów.
- Czas obliczeń modelu wynosi około 50 minut, co jest akceptowalne dla przyszłych zastosowań optymalizacyjnych.

Natomiast wyciągnięte wnioski są następujące:

- Zgodność rzeczywistego czasu topienia z symulowanym czasem topienia jest akceptowalna z punktu widzenia założeń badaczy.
 - Różnica w pozycji lewitacji wsadu może wynikać z uproszczeń przyjętych w modelu geometrycznym lub z ograniczeń w modelowaniu sił elektromagnetycznych. Różnica ta jest na tyle mała, że model może być uznany za wiarygodny.
 - Czas obliczeń modelu wynosi około 50 minut, co jest akceptowalnym czasem dla symulacji o takim poziomie złożoności. To oznacza, że model może być efektywnie wykorzystywany do przyszłych analiz predykcyjnych i optymalizacji, nie powodując nadmiernego opóźnienia w procesie decyzyjnym.
 - Wyniki symulacji sugerują, że model może służyć jako narzędzie do eksperymentalnego badania różnych scenariuszy, co może prowadzić do usprawnienia technologii.
- Korzystając z posiadanego wiarygodnego modelu symulacyjnego, w rozdziale 8.2, można było przejść do optymalizacji parametrów geometrycznych wzbudnika. Parametrami były: kąt wierzchołka wzbudnika i dolna średnica wzbudnika. Dodatkowym utrudnieniem była potrzeba każdorazowego wyliczenia pozycji wsadu

i stosunkowo długi czas obliczeń. W ramach tej części opracowano adaptacyjny algorytm optymalizacyjny, który w każdej iteracji aktualizował estymowaną funkcję celu, a optymalizację realizował z użyciem algorytmu ewolucyjnego. Rezultatem było uzyskanie suboptymalnej geometrii wzbudnika, która cechuje się znacznym polepszeniem sprawności względem rozwiązania początkowego.

Uzyskane wyniki:

- Wybrano, zaimplementowano i przetestowano algorytm ewolucyjny jako część nowej metody optymalizacyjnej.
- Wykonano optymalizację kształtu wzbudnika dla wsadu aluminiowego o kształcie kulistym, dla modelu obliczeniowego EM-T
- dla nowej geometrii wzbudnika osiągnięto trzykrotnie większą sprawność (z 0,0034 do 0,0091) w zestawieniu ze wzbudnikiem bazowym.

Wyciągnięte wnioski:

- Zastosowany model obliczeniowy symulujący działanie wzbudnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego okazał się skuteczny, co pozwoliło na przeprowadzenie optymalizacji geometrii wzbudnika.
 - Wykorzystanie aproksymowanej funkcji celu pozwoliło na znaczną redukcję czasu obliczeń, co jest istotne w kontekście złożonych symulacji numerycznych. Aktualizacja tej funkcji w trakcie optymalizacji umożliwiła precyzyjniejsze dopasowanie modelu do rzeczywistych potrzeb optymalizacyjnych.
 - Wynik optymalizacji wskazuje na trzykrotną poprawę sprawności procesu, co jest znaczącym osiągnięciem. Początkowa sprawność wynosiła 0,0034, a po optymalizacji wzrosła do 0,0091, co świadczy o skuteczności przeprowadzonych działań optymalizacyjnych. Ostateczna geometria wzbudnika, mimo że może być suboptymalna, stanowi istotną poprawę w stosunku do pierwotnej konfiguracji. Wzrost sprawności wskazuje na to, że przeprowadzone zmiany miały pozytywny wpływ na działanie wzbudnika.
- Żeby potwierdzić jakość, uzyskanych w procesie optymalizacji, wyników wykonano nowy wzbudnik, wzorując się na geometrii uzyskanej w procesie optymalizacji. Korzystając z procedury walidacji, dostosowano ją do wykonania pomiarów porównawczych pomiędzy wzbudnikiem wykorzystanym do walidacji modelu symulacyjnego i wzbudnikiem po optymalizacji. Uzyskane wyniki potwierdziły wzrost

sprawności procesu zgodny z wynikami symulacji. Rezultaty zostały zamieszczone w rozdziale 8.3.

Wyniki uzyskane na podstawie zestawienia bazowego wzbudnika z zoptymalizowanym są następujące:

- Natężenie prądu jest niższe dla zoptymalizowanego wzbudnika o 5 A. Różnica w częstotliwości prądu wynosi 31 623 Hz. Częstotliwość prądu jest niższa dla zoptymalizowanego wzbudnika.
- W przypadku podstawowego wzbudnika średnia pozycja wsadu podczas lewitacji jest wyższa o 5,5 mm niż w przypadku zoptymalizowanego wzbudnika.
- Średni czas topienia dla zoptymalizowanego wzbudnika jest krótszy o 60 sekund.

Wnioski wyciągnięte na tej podstawie:

- Różnice w parametrach prądowych są niewielkie, ale możliwość zastosowania niższego natężenia prądu może zmniejszyć koszty procesu.
 - Niższa pozycja lewitacji wsadu potwierdza wyniki uzyskane podczas optymalizacji kształtu wzbudnika.
 - Potwierdzono zmniejszenie czasu topienia wsadu dla zoptymalizowanego wzbudnika.
 - Uzyskane wyniki potwierdzają wiarygodność opracowanego modelu wzbudnika i zastosowanej metodyki optymalizacji.
- Następnie w rozdziale 8.4 zmieniono materiał, z którego był wykonany wsad. Zamiast aluminium wykorzystano tytan, co doprowadziło do zwiększenia ciężaru wsadu. Zmiana materiału spowodowała konieczność zwiększenia natężenia prądu z 300 do 760 A, aby uzyskać lewitację (tytan ma większą od aluminium gęstość). Okazało się, że natężenie prądu umożliwiające lewitację nie wystarcza do stopienia tytanu. Posiadane przez badaczy źródło zasilania nie umożliwia osiągnięcia tak dużych wartości prądu.

Wyniki na podstawie przeprowadzonych symulacji:

- Najniższym natężeniem prądu, dla którego wsad może stabilnie lewitować, jest 760 A przy położeniu wertykalnym 24 mm.

- Dla zestawienia parametrów (760 A i 24 mm) nie da się uzyskać temperatury topienia, ponieważ temperatura wsadu stabilizuje się w okolicach 1427 °C.
- Dla pozostałych rozważanych natężeń prądu (820, 860 i 1100 [A]) i odpowiadającym im pozycją stabilnej lewitacji uzyskano temperatury niższe niż 1427 °C.

Bazując na tych wynikach, wywnioskowano, że:

- Uzyskany wzbudnik nie nadaje się do topienia tytanu. Wydaje się to naturalne, w kontekście tego, że był przygotowywany i walidowany dla aluminiowego wsadu.
 - Żeby dostosować wzbudnik do topienia tytanu należałoby powtórzyć proces optymalizacji dla zmienionej charakterystyki wsadu.
- W rozdziale 9.1 kontynuowano badania nad wsadem aluminiowym i rozszerzono model obliczeniowy do EM-T-FD. Konieczność dołączenia analizy dynamiki płynów wynika z faktu, że po stopieniu materiału ciekły wsad przyjmuje kształt kropli (elipsoidy obrotowej, w zależności od parametrów procesu).

Na podstawie tego rozdziału wyciągnięto poniższe obserwacje:

- Dzięki zastosowaniu stałego obszaru z podwyższonym zagęszczeniem siatki udało się zredukować czas obliczeń i ostatecznie uzyskać czas 80 s na pojedynczą iterację obliczeń elektromagnetycznych i dynamiki płynów. Mimo to, ze względu na wymaganą dużą ilość iteracji, obliczenia trwały 12 godzin.

Na podstawie obserwacji sformułowano wnioski:

- Symulacja geometrii wsadu pozwala na odzwierciedlenie geometrii zaobserwowanej podczas eksperymentów.
 - Model umożliwia obserwowanie wielkości niewidocznych lub trudnych do zaobserwowania podczas eksperymentu, takich jak: rozkład sił elektrodynamicznych, prędkość przepływów i ciepło Joule'a.
- Następnie w rozdziale 9.2 przeprowadzono optymalizację dla modelu EM-T-FD, czyli uwzględniającą rzeczywisty kształt stopionego wsadu. Wyniki tej optymalizacji nie różniły się w istotny sposób od wyników uzyskanych dla wsadu o kształcie kulistym. Oczywiście, jak w przypadku wszelkich modeli numerycznych, wniosek ten jest prawdziwy dla przebadanej klasy przypadków.

Wyniki optymalizacji są następujące:

- Sprawność procesu dla wybranej geometrii wynosi 0,0058, jest więc ona o 0,0033 mniejsza od sprawności dla wsadu kulistego.
- Z kolei położenie wsadu jest niższe o 2 mm, zmniejszyło się więc z 30 do 28 mm.

Na podstawie tych wyników wywnioskowano, że:

- Po osiągnięciu temperatury topienia spada efektywność procesu. Może być to spowodowane wertykalnym wydłużeniem się wsadu, a co za tym idzie oddaleniem od zwojów wzbudnika. Drugim aspektem jest zmiana właściwości materiału, z którego jest wykonany wzbudnik.
- Metodyka rozwinięta w tym rozdziale może dawać wyniki analogiczne do metodyki wykorzystanej przy optymalizacji wzbudnika dla wsadu przed stopieniem.
- Pokrycie się suboptymalnej geometrii wzbudnika przed i po stopieniu wsadu jest zjawiskiem korzystnym. Modyfikacja geometrii wzbudnika w trakcie jego pracy komplikowałaby proces ETL.

Na podstawie przedstawionych wyżej osiągnięć uważam, że cel pracy został zrealizowany.

Zakres możliwych dalszych badań związanych z elektromagnetycznym topieniem lewitacyjnym jest bardzo szeroki. Przedstawione prace otwierają możliwość dalszych badań, które mogą być realizowane na tej podstawie. Korzystając z modelu symulacyjnego i nowej geometrii wzbudnika można by zwiększyć liczbę parametrów optymalizacji. Zmiana kierunku przewinięcia zwoju we wzbudniku jest ważnym źródłem asymetrii w modelu, wartościowym wkładem w rozważanej dziedzinie byłaby kategoryzacja rodzajów przewinięć i zbadaniem ich wpływu na układ. Innym rozszerzeniem badań może być zmiana liczby zwojów (w tym zastosowanie uzwojeń wielowarstwowych, częściowo wielowarstwowych) i optymalizacja dla tak skonstruowanych wzbudników. Kolejnym etapem badań może być optymalizacja dla zasilania wieloczęstotliwościowego. Jednak tego typu badania wymagają istotnych zmian w modelu obliczeniowym dla pola elektromagnetycznego.

Bibliografia

- [1] Ansys® electromagnetics suite, release 20.2.
- [2] Ansys® fluent, release 20.2.
- [3] Ansys® icepack, release 20.2, icepak help, specifying solution settings.
- [4] Ansys® spaceclaim, release 20.2.
- [5] Sabrina Yose Amelia, Diah Aryani, Ary Budi Warsito, Yunianto Purnomo. Comparison of the number of iterations of roots of non-linear equations in the regula falsi method, secant method, and bisection method using python. *Formosa Journal of Science and Technology*, 3(5):971–986, 2024.
- [6] Khalil Amine, i in. Multiobjective simulated annealing: Principles and algorithm variants. *Advances in Operations Research*, 2019, 2019.
- [7] Stefano Amore, Jürgen Brillo, Ivan Egry, Rada Novakovic. Surface tension of liquid cu–ti binary alloys measured by electromagnetic levitation and thermodynamic modelling. *Applied Surface Science*, 257(17):7739–7745, 2011.
- [8] Robert Atwood, Peter Lee, R. Minisandram, Robin Forbes Jones. Multiscale modelling of microstructure formation during vacuum arc remelting of titanium 6-4: Special section: Proceedings of the 2003 international symposium on liquid metals (guest editors: P. d. lee, a. mitchell, a. jardy, j.-p. bellot). *Journal of Materials Science*, 39, 12 2004.
- [9] Yuya Baba, Takamitsu Inoue, Ken-ichi Sugioka, Hidekazu Kobatake, Hiroyuki Fukuyama, Masaki Kubo, Takao Tsukada. Thermal conductivity measurement of molten copper using an electromagnetic levitator superimposed with a static magnetic field. *Measurement Science and Technology*, 23(4):045103, 2012.

- [10] Sayavur I. Bakhtiyarov, Dennis A. Siginer. Electromagnetic levitation part i: theoretical and experimental considerations. *Fluid Dyn. Mater. Process*, 4(2):99–112, 2008.
- [11] Mickael Beaudhuin, Kader Zaidat, T. Duffar, Mustapha Lemiti. Silicon purity controlled under electromagnetic levitation (spyce): Influences on undercooling. *J. Mater. Sci.*, 45:2218–2222, 04 2010.
- [12] Sven Binder, Petr Konstantinovich Galenko, Dieter Herlach. The effect of fluid flow on the solidification of ni2b from the undercooled melt. *Journal of Applied Physics*, 115(5):053511, 2014.
- [13] Aleksei Boikov, Vladimir Payor. The present issues of control automation for levitation metal melting. *Symmetry*, 14(10):1968, 2022.
- [14] Valdis Bojarevics, Robert W. Hyers. Levitated liquid dynamics in reduced gravity and gravity-compensating magnetic fields. *JOM*, 64(9):1089–1096, 2012.
- [15] Jeremiah U. Brackbill, Douglas B. Kothe, Charles Zemach. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of computational physics*, 100(2):335–354, 1992.
- [16] Jürgen Brillo, Giorgio Lauletta, Luca Vaianella, Elisabetta Arato, Donatella Giuranno, Rada Novakovic, Enrica Ricci. Surface tension of liquid ag–cu binary alloys. *Isij International*, 54(9):2115–2119, 2014.
- [17] W. Brisley, B. S. Thornton. Electromagnetic levitation calculations for axially symmetric systems. *British Journal of Applied Physics*, 14(10):682–686, 1963.
- [18] Jason Brownlee. *Clever algorithms: nature-inspired programming recipes*. Jason Brownlee, 2011.
- [19] Piotr Buliński, Jacek Smolka, Sławomir Golak, Roman Przyłucki, Michał Palacz, Grzegorz Siwiec, Jakub Lipart, Ryszard Bialecki, Leszek Blacha. Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace. *Applied Thermal Engineering*, 124:1003–1013, 2017.
- [20] Piotr Buliński, Jacek Smolka, Grzegorz Siwiec, Leszek Blacha, Sławomir Golak, Roman Przyłucki, Michał Palacz, Bartłomiej Melka. Numerical examination of

- the evaporation process within a vacuum induction furnace with a comparison to experimental results. *Applied Thermal Engineering*, 150:348–358, 2019.
- [21] Christopher Bullard, Robert W. Hyers, Behrouz Abedian. Spin-up instability of a levitated molten drop in magnetohydrodynamic-flow transition to turbulence. *IEEE transactions on magnetics*, 41(7):2230–2235, 2005.
- [22] Xinxia Cai, H. P. Wang, Peng Lü, B. Wei. Optimized electromagnetic fields levitate bulk metallic materials. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 49:2252–2260, 2018.
- [23] Chuqing Cao, T. Letzig, G. P. Görler, Dieter Herlach. Liquid phase separation in undercooled co-cu alloys processed by electromagnetic levitation and differential thermal analysis. *Journal of alloys and compounds*, 325(1-2):113–117, 2001.
- [24] Dong Chen, Shiqi Li, JunFeng Wang, Yi Feng, Yang Liu. A multi-objective trajectory planning method based on the improved immune clonal selection algorithm. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 59:431–442, 2019.
- [25] Shanjun Chen, Yan Chen, Huafeng Zhang, Yongjian Tang, Jianjun Wei, Weiguo Sun. Bulk synthesis and characterization of ti₃al nanoparticles by flow-levitation method. *Journal of Nanomaterials*, 2013, 2013.
- [26] Wei Chen, Xi Chen, Jianbing Peng, Mahdi Panahi, Saro Lee. Landslide susceptibility modeling based on anfis with teaching-learning-based optimization and satin bowerbird optimizer. *Geoscience Frontiers*, 12(1):93–107, 2021.
- [27] Alok Choudhury, Eckart Hengsberger. Electron beam melting and refining of metals and alloys. *ISIJ international*, 32(5):673–681, 1992.
- [28] Sujaul Chowdhury, Urmi Talukder. Numerical calculation of energy spectrum of gaas-algaas quantum well having abrupt potential steps using regula falsi method. *Numerical Exploration of Isolated GaAs-AlGaAs Quantum Well*, strony 13–31. Springer, 2024.
- [29] Chunxiang Cui, BaoMin Hu, Lichen Zhao, Shuangjin Liu. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Materials & Design*, 32(3):1684–1691, 2011.

- [30] Nikita Doikov, Konstantin Mishchenko, Yurii Nesterov. Super-universal regularized newton method. *SIAM Journal on Optimization*, 34(1):27–56, 2024.
- [31] Nikita Doikov, Yurii Nesterov. Gradient regularization of newton method with bregman distances. *Mathematical programming*, 204(1):1–25, 2024.
- [32] Jacques Gustave Dondelinger, D. A. R. Kay, Alexander Mclean. The effect of chromium on the activity coefficient of sulfur in liquid fe- cr- s alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2(11):3203–3208, 1971.
- [33] Patric Dular, Christophe Geuzaine. GetDP reference manual: the documentation for GetDP, a general environment for the treatment of discrete problems. <http://getdp.info>.
- [34] Iván Egry, A. Diefenbach, W. Dreier, J. Piller. Containerless processing in space—thermophysical property measurements using electromagnetic levitation. *International journal of Thermophysics*, 22(2):569–578, 2001.
- [35] Mohamed El-Genk, Jean-Michel Tournier. A review of refractory metal alloys and mechanically alloyed-oxide dispersion strengthened steels for space nuclear power systems. *Journal of Nuclear Materials*, 340:93–112, 04 2005.
- [36] Dmitri Elanski, Kouji Mimura, Taizo Ito, Minoru Isshiki. Purification of tantalum by means of hydrogen plasma arc melting. *Materials Letters*, 30(1):1–5, 1997.
- [37] Guo-Hua Fan, Yubin Zhang, Julian Driver, D. Jensen. Oriented growth during recrystallization revisited in three dimensions. *Scripta Materialia*, s 72–73:9–12, 02 2014.
- [38] Simbarashe Fashu, Mykhaylo Lototsky, Moegamat Wafeeq Davids, Lydia Pickering, Vladimir Linkov, Sun Tai, Tang Renheng, Xiao Fangming, Pavel V. Fursikov, Boris P. Tarasov. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys. *Materials & Design*, 186:108295, 2020.
- [39] Lin Feng, Wan-Yuan Shi. The influence of eddy effect of coils on flow and temperature fields of molten droplet in electromagnetic levitation device. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 46(4):1895–1901, 2015.
- [40] Lin Feng, Wan-Yuan Shi. Influence of coil angle arrangement on dynamic deformation and stability of molten droplet in electromagnetic levitation system. *ISIJ International*, 56(1):50–56, 2016.

- [41] Eckehard Fromm, Hermann Jehn. Electromagnetic forces and power absorption in levitation melting. *British Journal of Applied Physics*, 16(5):653–663, may 1965.
- [42] Georg Frommeyer, Ralf Rablbauer. High temperature materials based on the intermetallic compound nial reinforced by refractory metals for advanced energy conversion technologies. *steel research international*, 79(7):507–512, 2008.
- [43] Hidetoshi Fujii, Taihei Matsumoto, Shun Izutani, Shoji Kiguchi, Kiyoshi Nogi. Surface tension of molten silicon measured by microgravity oscillating drop method and improved sessile drop method. *Acta Materialia*, 54(5):1221–1225, 2006.
- [44] Makoto Fukuda, Akira Hasegawa, Shuhei Nogami. Thermal properties of pure tungsten and its alloys for fusion applications. *Fusion Engineering and Design*, 132:1–6, 2018.
- [45] Ahmed G. Gad. Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review. *Archives of computational methods in engineering*, 29(5):2531–2561, 2022.
- [46] Lei Gao, Zhe Shi, Donghui Li, Guifang Zhang, Yindong Yang, Alexander Mclean, Kinnor Chattopadhyay. Applications of electromagnetic levitation and development of mathematical models: A review of the last 15 years (2000 to 2015). *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(1):537–547, 2016.
- [47] Christophe Geuzaine, Jean-François Remacle. Gmsh: A 3-d finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. *International journal for numerical methods in engineering*, 79(11):1309–1331, 2009.
- [48] David Hancock, David Homfray, Michael Porton, Iain Todd, Brad Wynne. Refractory metals as structural materials for fusion high heat flux components. *Journal of Nuclear Materials*, 512:169–183, 2018.
- [49] Cyril W. Hirt, Billy D. Nichols. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1):201–225, 1981.
- [50] Dirk Holland-Moritz, Thomas Schenk, P. Convert, Thomas Christian Hansen, Dieter Herlach. Electromagnetic levitation apparatus for diffraction investigations on the short-range order of undercooled metallic melts. *Measurement Science and Technology*, 16(2):372, 2005.

- [51] D. Hou, Z. Jiang, Yanwu Dong, Yulong Cao, H. Cao, Wei Gong. Thermodynamic design of electroslag remelting slag for high titanium and low aluminium stainless steel based on imct. *Ironmaking Steelmaking*, 43:1–9, 03 2016.
- [52] Robert W. Hyers. Fluid flow effects in levitated droplets. *Measurement science and Technology*, 16(2):394, 2005.
- [53] Hasan Abdurraheem Jubair, Saad Shakir Mahmood, Alan Jalal Abdulqader. Powell’s method for solving fuzzy optimization problem. *AIP Conference Proceedings*, wolumen 2834. AIP Publishing, 2023.
- [54] Nianbo Kang, Zhonghua Miao, Quan-Ke Pan, Weimin Li, M Fatih Tasgetiren. Multi-objective teaching-learning-based optimizer for a multi-weeding robot task assignment problem. *Tsinghua Science and Technology*, 29(5):1249–1265, 2024.
- [55] L. Kanya Kumari, B. Naga Jagadesh. An adaptive teaching learning based optimization technique for feature selection to classify mammogram medical images in breast cancer detection. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 15(1):35–48, 2024.
- [56] Pavel Karban, David Pánek, Tamás Orosz, Iveta Petrášová, Ivo Doležel. Fem based robust design optimization with agros and artap. *Computers & Mathematics with Applications*, 81:618–633, 2021.
- [57] Ahmad Kermanpur, Majid Jafari Bahramabadi, Majid Vaghayenegar. Electromagnetic-thermal coupled simulation of levitation melting of metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 211:222–229, 02 2011.
- [58] Ahmad Kermanpur, Behnam Nekooei, Majid Vaghayenegar, Hassan Ghase-mi Yazdabadi. Bulk synthesis of monodisperse fe nanoparticles by electromagnetic levitational gas condensation method. *Materials Letters*, strony 575–577, 07 2013.
- [59] Wolfram Knabl, Gerhard Leichtfried, Roland Stickler. Refractory metals and refractory metal alloys. *Springer Handbook of Materials Data*, strony 307–337, 2018.
- [60] Hidekazu Kobatake, Hossein Khosroabadi, Hiroyuki Fukuyama. Normal spectral emissivity of stable and undercooled liquid silicon using electromagnetic levita-

- tion in a dc magnetic field. *Measurement Science and Technology*, 22(1):015102, 2010.
- [61] Hidekazu Kobatake, Hossein Khosroabadi, Hiroyuki Fukuyama. Normal spectral emissivity measurement of liquid iron and nickel using electromagnetic levitation in direct current magnetic field. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(7):2466–2472, 2012.
- [62] Boya Anil Kumar, B. Jyothi, Arvind R. Singh, Mohit Bajaj, Rajkumar Singh Rathore, Milkias Berhanu Tuka. Hybrid genetic algorithm-simulated annealing based electric vehicle charging station placement for optimizing distribution network resilience. *Scientific Reports*, 14(1):7637, 2024.
- [63] Rajiv Kumar, Minakshi Memoria. A review of memetic algorithm and its application in traveling salesman problem. *Int. J. Emerg. Technol.*, 11(2):1110–1115, 2020.
- [64] Ryo Kurosawa, Takamitsu Inoue, Yuya Baba, Ken-ichi Sugioka, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Hiroyuki Fukuyama. Normal spectral emissivity measurement of molten copper using an electromagnetic levitator superimposed with a static magnetic field. *Measurement Science and Technology*, 24(1):015603, 2012.
- [65] Max Körner, Michał Schulz, Holger Fritze, Christian Stenzel. Control of partial pressure of oxygen in the ppm range based on a two metal-oxide buffer system. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 190:702–706, 01 2014.
- [66] Jonghyun Lee, Douglas M. Matson, Sven Binder, Matthias Kolbe, Dieter Herlach, Robert W. Hyers. Magneto-hydrodynamic modeling and experimental validation of convection inside electromagnetically levitated co-cu droplets. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(3):1018–1023, 2014.
- [67] J. C. Lewis, H. R. J. Neumayer, Ro.G. Ward. The stabilization of liquid metal during levitation melting. *Journal of Scientific Instruments*, 39(11):569, 1962.
- [68] Rui Li, Ling Wang, Wenyin Gong, Fei Ming. An evolutionary multitasking memetic algorithm for multi-objective distributed heterogeneous welding flow shop scheduling. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2024.

- [69] Wen Li, Qinghua Su, Zhongbo Hu. A grey prediction evolutionary algorithm with a surrogate model based on quadratic interpolation. *Expert Systems with Applications*, 236:121261, 2024.
- [70] R. P. Liu, Thomas Volkman, Dieter Herlach. Undercooling and solidification of si by electromagnetic levitation. *Acta materialia*, 49(3):439–444, 2001.
- [71] Jiangshan Luo, K. Li, Xibo. Li, Y. J. Shu, Y. J. Tang. Phase evolution and alloying mechanism of titanium aluminide nanoparticles. *Journal of alloys and compounds*, 615:333–337, 2014.
- [72] Mahdiah Malekzadeh, Mohammad Halali. Production of silver nanoparticles by electromagnetic levitation gas condensation. *Chemical engineering journal*, 168(1):441–445, 2011.
- [73] Alexander McLean. The science and technology of steelmaking—measurements, models, and manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37(3):319–332, 2006.
- [74] Armin Vahid Mohammadi, Mohammad Halali. Synthesis and characterization of pure metallic titanium nanoparticles by an electromagnetic levitation melting gas condensation method. *RSC Advances*, 4(14):7104–7108, 2014.
- [75] Arimichi Morita, Hisao Fukui, Hideaki Tadano, Shizuo Hayashi, Jiro Hasegawa, Mitsuo Niinomi. Alloying titanium and tantalum by cold crucible levitation melting (cclm) furnace. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1):208–213, 2000.
- [76] O. Mucka. German patent no. 422004, october 30, 1923.[2] ec okress, dm wroughton, g. comenetz, ph brace, and jcr kelly, electromagnetic levitation of solid and molten metals. *J. Appl. Phys*, 23:545–552, 1952.
- [77] Senthilnathan Natarajan, Venkatachalam Gopalan, Raja Annamalai Arunjunai Rajan, Chun-Ping Jen. Effect of rare earth metals (y, la) and refractory metals (mo, ta, re) to improve the mechanical properties of w–ni–fe alloy—a review. *Materials*, 14(7):1660, 2021.
- [78] Valentin Nemkov, Robert Goldstein, K. Kreter, John Jackowski. Modeling and optimization of cold crucible furnaces for melting metals. 05 2013.

- [79] Mitsuo Niinomi. Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and materials transactions A*, 33(3):477–486, 2002.
- [80] C. Notthoff, H. Franz, Michael Hanfland, Dieter Herlach, D. Holland-Moritz, Winfried Pertry. Electromagnetic levitation apparatus for investigation of the phase selection in undercooled melts by energy-dispersive x-ray diffraction. *Review of Scientific Instruments*, 71:3791–3796, 10 2000.
- [81] Błażej Nycz, Roman Przyłucki, Łukasz Maliński. Comparison of characteristics for two selected inductors for levitation melting. *2023 14th International Conference on Measurement*, strony 222–225. IEEE, 2023.
- [82] Robert Odette, Steven Zinkle. *Structural alloys for nuclear energy applications*. Newnes, 2019.
- [83] Jung-Min Oh, Ki-Min Roh, Jae-Won Lim. Brief review of removal effect of hydrogen-plasma arc melting on refining of pure titanium and titanium alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(48):23033–23041, 2016.
- [84] E. C. Okress, D. M. Wroughton, G. Comenetz, P. H. Brace, J. C. R. Kelly. Electromagnetic levitation of solid and molten metals. *Journal of Applied Physics*, 23(5):545–552, 1952.
- [85] Piotr Ostrowski, Piotr Sprawka, Ireneusz Krysovaty. Analiza dynamiki wsadu podczas topienia indukcyjnego w warunkach lewitacji. *TTS Technika Transportu Szybowego*, 23, 2016.
- [86] Zhaoxi Ou, Shuai Wang. Finding robust and influential nodes on directed networks using a memetic algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 87:101542, 2024.
- [87] Shumpei Ozawa, Keisuke Morohoshi, Taketoshi Hibiya. Influence of oxygen partial pressure on surface tension of molten type 304 and 316 stainless steels measured by oscillating droplet method using electromagnetic levitation. *ISIJ international*, 54(9):2097–2103, 2014.
- [88] Michal Palacz, Bartłomiej Melka, Bartosz Wecki, Grzegorz Siwec, Roman Przyłucki, Piotr Bulinski, Sławomir Golak, Leszek Blacha, Jacek Smolka. Experimental analysis of the aluminium melting process in industrial cold crucible furnaces. *Metals and Materials International*, 26(5):695–707, 2020.

- [89] David Pánek, Pavel Karban, Tamás Orosz, Ivo Doležel. Comparison of simplified techniques for solving selected coupled electroheat problems. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2020.
- [90] W. A. Peifer. Levitation melting, a survey of the state-of-the-art. *JOM*, 17(5):487–493, 1965.
- [91] Rongxun Piao, Shaoli Yang, Lan Ma, Tao Wang. Vacuum electromagnetic levitation melting of ti–al based alloy prepared by aluminothermic reduction of acid soluble ti bearing slag. *Metals and Materials International*, 26:130–142, 2020.
- [92] N. Eswara Prasad, Russel J. H. Wanhill. *Aerospace materials and material technologies*, wolumen 1. Springer, 2017.
- [93] Raghupatruni Prasad, Gandham Phanikumar. Phase evolution and properties of ni 50 co 23 fe 2 ga 25 heusler alloy undercooled by electromagnetic levitation. *Intermetallics*, 19, 09 2011.
- [94] Roman Przylucki, Sławomir Golak. The stress effects occurring during induction heating of titanium. *Solid State Phenomena*, wolumen 211, strony 149–154. Trans Tech Publ, 2014.
- [95] N. Raghava Rao, Sree Pokkuluri Kiran, Tamboli Amena, A. Senthilkumar, R. Sivakumar, M. Ashok Kumar, Sampathkumar Velusamy, i in. Enhancing rainwater harvesting and groundwater recharge efficiency with multi-dimensional lstm and clonal selection algorithm. *Groundwater for Sustainable Development*, 25:101167, 2024.
- [96] Tomer Ron, Avi Leon, Vladimir Popov, Evgeny Strokin, Dan Eliezer, Amnon Shirizly, Eli Aghion. Synthesis of refractory high-entropy alloy wtamonbv by powder bed fusion process using mixed elemental alloying powder. *Materials*, 15(12):4043, 2022.
- [97] Alan Roy, Valdis Bojarevics, Koulis Pericleous. Multi-physics modeling in the electromagnetic levitation and melting of reactive metals. *CMS, University of Greenwich*, 2011.

- [98] Zachary Royer, C. Tackes, Richard LeSar, R. Napolitano. Coil optimization for electromagnetic levitation using a genetic like algorithm. *Journal of Applied Physics*, 113, 06 2013.
- [99] Zachary L. Royer. *Optimizing electromagnetic levitation design to enhance thermodynamic measurement*. Praca doktorska, Iowa State University, 2012.
- [100] Youcef Saad, Martin H. Schultz. Gmres: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems. *SIAM Journal on scientific and statistical computing*, 7(3):856–869, 1986.
- [101] Antoni Samsonov, Pavel S. Solov'ev, Sergey I. Solov'ev. The bisection method for solving the nonlinear bar eigenvalue problem. *Journal of Physics: Conference Series*, wolumen 1158, strona 042011. IOP Publishing, 2019.
- [102] M. Sankar, V. V. Satya Prasad, R. G. Baligidad, A. A. Gokhale. Effect of vacuum arc remelting and processing parameters on structure and properties of high purity niobium. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 50:120–125, 2015.
- [103] Idan Sassonker, Alon Kuperman. Electro-mechanical modeling of electromagnetic levitation melting system driven by a series resonant inverter with experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 208:112578, 2020.
- [104] Madan Mohan Sati, Dinesh Kumar, Akhilesh Singh, Mohan Raparathi, Faisal Yousef Alghayadh, Mukesh Soni. Two-area power system with automatic generation control utilizing pid control, fopid, particle swarm optimization, and genetic algorithms. *2024 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, strony 1–6. IEEE, 2024.
- [105] Umesh Chandra Saxena. Levitation melting of zirconium niobium alloys and their study. *Indian institute of technology*, 1968.
- [106] Michał Schulz, Jürgen Brillo, Christian Stenzel, Holger Fritze. Oxygen partial pressure control for microgravity experiments. *Solid State Ionics*, 225:332–336, 2012.

- [107] A. Seidel, W. Soellner, Christian Stenzel. Eml-an electromagnetic levitator for the international space station. *Journal of Physics: Conference Series*, wolumen 327, strona 012057. IOP Publishing, 2011.
- [108] Federico Sichetti, Zizhou Huang, Marco Attene, Denis Zorin, Enrico Puppo, Daniele Panozzo. High-order continuous geometrical validity. *arXiv e-prints*, strony arXiv–2406, 2024.
- [109] Jerzy Siwka. Equilibrium constants and nitrogen activity in liquid metals and iron alloys. *ISIJ international*, 48(4):385–394, 2008.
- [110] Jerzy Siwka, Artur Hutny. An universal formula for the calculation of nitrogen solubility in liquid nitrogen-alloyed steels. *Metallurgija*, 48(1):23–27, 2009.
- [111] Adam Slowik, Halina Kwasnicka. Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems. *Neural Computing and Applications*, 32:12363–12379, 2020.
- [112] Kenneth Sörensen. Metaheuristics—the metaphor exposed. *International Transactions in Operational Research*, 22(1):3–18, 2015.
- [113] Sergejs Spitans, Egbert Baake, Andris Jakovics, Henrik Franz. Numerical and experimental investigations of a large scale electromagnetic levitation melting of metals. *10-th PAMIR International Conference - Fundamental and Applied MHD*, 2016.
- [114] Sergejs Spitans, Egbert Baake, Bernard Nacke, A. Jakovičs. New technology for large scale electromagnetic levitation melting of metals. *Magnetohydrodynamics*, 51(1):121–132, 2015.
- [115] Sergejs Spitans, Henrik Franz, Egbert Baake, Andris Jakovics. Large-scale levitation melting and casting of titanium alloys. *Magnetohydrodynamics*, 53(4):633–642, 2017.
- [116] Sergejs Spitans, Andris Jakovičs, Egbert Baake, Bernard Nacke. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 47(4):385–397, 2011.
- [117] Sergejs Spitans, Andris Jakovičs, Egbert. Baake, Bernard Nacke. Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field: Part

- i. implementation and verification of model. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(3):593–605, 2013.
- [118] Hisyam Rahmawan Suharno, Nyoman Gunantara, Made Sudarma. Analysis of data warehouse design using powell method.
- [119] Malcolm Sunderland, A. E. Hamielec, W. K. Lu, Alexander Mclean. Thermal diffusion in kinetic and equilibrium measurements by levitation technique. *Metallurgical Transactions*, 4(2):575–583, 1973.
- [120] Kannadhasan Suriyan, R. Nagarajan. Particle swarm optimization in biomedical technologies: Innovations, challenges, and opportunities. *Emerging Technologies for Health Literacy and Medical Practice*, strony 220–238, 2024.
- [121] Osamu Takeda, Toru H. Okabe. Current status of titanium recycling and related technologies. *Jom*, 71(6):1981–1990, 2019.
- [122] Stephen Thomas, Erin Carson, Miroslav Rozložník, Arielle Carr, Katarzyna Świrydowicz. Iterated gauss–seidel gmres. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 46(2):S254–S279, 2024.
- [123] Lyubov Valer’evna Toropova, Dmitry Valerievich Alexandrov, A. Kao, M. Rettenmayr, Petr Konstantinovich Galenko. Electromagnetic levitation method as a containerless experimental technique. *Physics–Uspekhi*, strona 65, 2022.
- [124] Damien Tournet, Ch-A Gandin. A generalized segregation model for concurrent dendritic, peritectic and eutectic solidification. *Acta Materialia*, 57(7):2066–2079, 2009.
- [125] Damien Tournet, Guillaume Reinhart, Ch-A Gandin, G. N. Iles, Ulf Dahlborg, Monique Calvo-Dahlborg, C. M. Bao. Gas atomization of al–ni powders: Solidification modeling and neutron diffraction analysis. *Acta Materialia*, 59(17):6658–6669, 2011.
- [126] Hoa Tran, Thang Le-Xuan, Samir Khatir, Guido De Roeck, Thanh Bui-Tien, Magd Wahab. A promising approach using fibonacci sequence-based optimization algorithms and advanced computing. *Scientific Reports*, 13, 02 2023.
- [127] Rasul Tutunov, Haitham Bou-Ammar, Ali Jadbabaie. Distributed newton method for large-scale consensus optimization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(10):3983–3994, 2019.

- [128] Masataka Usui, Hiroshi Niki, Toshiyuki Kohno. Adaptive gauss-seidel method for linear systems. *International Journal of Computer Mathematics*, 51(1-2):119–125, 1994.
- [129] Majid Vaghayenegar, Ahmad Kermanpur, M.H. Abbasi, Hassan Ghasemi Yazdabadi. Effects of process parameters on synthesis of zn ultrafine/nanoparticles by electromagnetic levitational gas condensation. *Advanced Powder Technology - ADVANCED POWDER TECHNOL*, 21:556–563, 09 2010.
- [130] Majid. Vaghayenegar, Ahmad. Kermanpur, Mohamad Hasan Abbasi. Formation mechanism of zno nanorods produced by the electromagnetic levitational gas condensation method. *Scientia Iranica*, 18(6):1647–1651, 2011.
- [131] Majid Vaghayenegar, Ahmad Kermanpur, Mohamad Hasan Abbasi. Bulk synthesis of zno nanoparticles by the one-step electromagnetic levitational gas condensation method. *Ceramics International*, 38(7):5871–5878, 2012.
- [132] Metin Vural, Aleksandr Y. Aravkin, Sławomir Stańczak. Norm minimization with regula falsi type root finding methods. *IEEE Signal Processing Letters*, 28:2132–2136, 2021.
- [133] Katia Vutova, Vania Vassileva, Vladislava Stefanova, Dinesh Amalnerkar, Takeshi Tanaka. Effect of electron beam method on processing of titanium technogenic material. *Metals*, 9(6):683, 2019.
- [134] L. R. Weisberg, G. R. Gunther-Mohr. Radiant energy heater. *Review of Scientific Instruments*, 26(9):896–896, 1955.
- [135] Chang-Da Wen, Issam Mudawar. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (mrt) emissivity models. *International journal of heat and mass transfer*, 48(7):1316–1329, 2005.
- [136] James C. Williams, Rodney R. Boyer. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components. *Metals*, 10(6):705, 2020.
- [137] J. P. Witteveen, Raoul . van Gastel, Arie van Houselt, Harold J. W. Zandvliet. 3d modeling of electromagnetic levitation coils. *Current Applied Physics*, 32:45–49, 2021.

- [138] Paul Wu, Yindong Yang, Mansoor Barati, Alex McLean. The effect of thermal diffusion on decarburization kinetics. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(6):1974–1978, 2014.
- [139] Paul Wu, Yindong Yang, Mansoor Barati, Alex Mclean. Thermodynamic and kinetic aspects of sulfur evaporation from fe–c alloy droplets. *ISIJ International*, 55(4):717–722, 2015.
- [140] Paul Wu, Yindong Yang, Mansoor Barati, Alexander Mclean. Effect of chromium–sulphur interactions on decarburisation of levitated fe–c alloy droplets by co 2 –ar gas mixtures. *Ironmaking Steelmaking*, 42:1743281215Y.000, 04 2015.
- [141] Dongmei Xu, Chao Xu, Chuqing Cao, Simiao Yu, Xianglong Liu, Fan Yang, Tenglin Liang. Parametric modeling and singularity analysis of a novel 6-pus parallel robot driven by piezoelectric linear actuators. *Journal of Mechanical Science and Technology*, strony 1–11, 2024.
- [142] Jinxin Xu, Haixin Wu, Yu Cheng, Liyang Wang, Xin Yang, Xintong Fu, Yuelong Su. Optimization of worker scheduling at logistics depots using genetic algorithms and simulated annealing. *arXiv preprint arXiv:2405.11729*, 2024.
- [143] S. Yadav, S. K. Verma, S. K. Nagar. Optimized pid controller for magnetic levitation system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(1):778 – 782, 2016.
- [144] Chao Yang, Jianrong Gao. Dendritic growth kinetics and disorder trapping of the intermetallic compound ni3sn under a static magnetic field. *Journal of crystal growth*, 394:24–27, 2014.
- [145] Jieren Yang, Hu Wang, Yulun Wu, Xuyang Wang, Rui Hu. A combined electromagnetic levitation melting, counter-gravity casting, and mold preheating furnace for producing tial alloy. *Advanced Engineering Materials*, 20(2):1700526, 2018.
- [146] X. H. Yang, C. D. Wang, L. Yang, J. T. Zou, P. Xiao, S. H. Liang. Effects of nb addition and different cooling methods on microstructures and properties of cu–cr alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(8):5008–5017, 2020.
- [147] Jiangning Zhang, Xiangtai Li, Yabiao Wang, Chengjie Wang, Yibo Yang, Yong Liu, Dacheng Tao. Eatformer: Improving vision transformer inspired by evolutionary algorithm. *International Journal of Computer Vision*, strony 1–28, 2024.

- [148] Sen Zhang, Yongquan Zhou, i in. Grey wolf optimizer based on powell local optimization method for clustering analysis. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015, 2015.
- [149] Weiwei Zhang, Jiaxin Yang, Qishan He, Zhiyang Liu, Juntong Wang, Zhi Rao, Meng Li, Xiaoqiu Yu, Weizheng Zhang. A dual-feedback adaptive clone selection algorithm with golden sine search for parameter identification of photovoltaic models. *IEEE Access*, 2024.
- [150] Zhu Zhi-shou. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in china. , 34(4):44–50, 2014.
- [151] Kai Zhou, H. P. Wang, Beiyu Wei. Determining thermophysical properties of undercooled liquid ti–al alloy by electromagnetic levitation. *Chemical Physics Letters*, 521:52–54, 2012.
- [152] Kai Zhou, H. P. Wang, Beiyu Wei. Thermophysical properties of substantially undercooled liquid ti-al-nb ternary alloy measured by electromagnetic levitation. *Philosophical magazine letters*, 93(3):138–141, 2013.
- [153] Zhi Ming Zhou, Li Wen Tang, Wei Jiu Huang, Tao Zhou, Xiao Ping Li, Jing Luo, Cheng Yun Peng, Jie Zhan. Phase selection in undercooled cu85cr15 composites. *Advanced Materials Research*, wolumen 239, strony 695–698. Trans Tech Publ, 2011.
- [154] Doug J. Zuliani, Alexander Mclean. The sulphurization of iron droplets in the presence of manganese vaporization. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 18(3):323–331, 1979.

Spis rysunków

2.1	Geometria modelu zaproponowanego przez Witteveen i innych. Źródło: [137]	18
2.2	Geometria modelu zaproponowanego przez Royera i innych. Źródło: [98]	19
2.3	Geometria modelu zaproponowanego przez Kermanpura i innych. Źródło: [57]	19
2.4	Geometria modelu zaproponowanego przez Sassonkera i Kupermana. Źródło: [103]	20
2.5	Geometria modelu symulującego wsad po stopieniu przedstawionego przez Bojarevics i Hyers. Źródło: [14]	22
2.6	Geometria modelu symulującego wsad po stopieniu przedstawionego przez Spitans i innych. Źródło: [116]	23
2.7	Geometria modelu symulującego wsad po stopieniu przedstawionego przez Spitans i innych. Źródło: [117]	24
2.8	Najbardziej obiecujące położenia zwojów wzbudnika wybrane przez Royera i innych. Źródło: [99]	26
2.9	Wizualizacja dwuwarstwowego ułożenia zwojów wzbudnika, zaproponowana przez Cai i innych. Źródło: [22]	27
2.10	Geometria wzbudnika rozważana przez Feng ze swoją grupą. Źródło: [40]	29
3.1	Zakres pracy zawartej w pracy doktorskiej.	32
4.1	Zależności pomiędzy polami fizycznymi podczas topienia lewitacyjnego. EM oznacza pole elektromagnetyczne; $CFD-T$ odnosi się do dynamiki płynów i obliczeń temperatury; $geom.T$ to zmiana geometrii i temperatury, po obliczeniu $CFD-T$; f_{em} to gęstość siły elektromagnetycznej, a p odpowiada wartości gęstości objętościowej mocy czynnej uzyskanej z obliczeń pola EM ;	41
4.2	Wizualizacja przykładowej funkcji z pojedynczym ekstremum.	47
4.3	Wizualizacja funkcji z wieloma ekstremami.	54

4.4	Przykładowa funkcja celu w zadanych granicach z zaznaczonym na zielono rozwiązaniem optymalnym i zaznaczonym na czerwono rozwiązaniem suboptymalnym.	55
5.1	Przykładowa funkcja celu w zadanych granicach z zaznaczonym na zielono rozwiązaniem optymalnym i zaznaczonym na czerwono przykładowym rozwiązaniem suboptymalnym.	66
5.2	Przekrój wzbudnika.	67
5.3	Zamodelowana geometria wzbudnika.	69
5.4	Schemat wyznaczania geometrii kolejnych zawinięć wzbudnika.	70
5.5	Model geometrii wzbudnika przygotowany w programie SpaceClaim dla wzbudnika, na którym wykonano pomiary.	73
5.6	Przepływ danych między oprogramowaniem.	74
5.7	Modyfikator termiczny dla aluminium zdefiniowany w środowisku Ansys.	75
5.8	Środowisko modelu elektromagnetycznego, w którym przeprowadzono obliczenia. Powierzchnie środowiska oznaczono kolorem amarantowym. Litery oznaczają powierzchnie środowiska, do których są przypisane warunki brzegowe. ABC oznaczone jaśniejszym kolorem opisują powierzchnie widoczne z danej perspektywy, natomiast DEF, do których użyto ciemniejszego odcienia oznaczają powierzchnie zakryte przez powierzchnie ABC.	76
5.9	Powierzchnia E środowiska, do którego są przypisane warunki brzegowe z zaznaczonymi przyłączeniami wzbudnika (E1 i E2).	77
5.10	Środowisko modelu ciepłno-przepływowego, w którym przeprowadzono obliczenia. Powierzchnie środowiska są oznaczone kolorem amarantowym. Litery oznaczają powierzchnie środowiska, do których są przypisane warunki brzegowe. ABC oznaczone jaśniejszym kolorem opisują powierzchnie widoczne z danej perspektywy. Natomiast DEF, do których użyto ciemniejszego odcienia, oznaczają powierzchnie zakryte przez powierzchnie ABC.	78
5.11	Analiza wrażliwości siły elektrodynamicznej dla różnych gęstości siatki dyskretyzacyjnej. Czerwony punkt odpowiada gęstości siatki, dla której została przeprowadzona symulacja.	80
5.12	Analiza wrażliwości mocy czynnej wydzielonej dla wsadu dla różnych gęstości siatki dyskretyzacji. Czerwony punkt odpowiada gęstości siatki, dla której została przeprowadzona symulacja.	80

5.13	Schemat cyklu symulacji geometrii stopionego wsadu.	81
5.14	Przykładowa dyskretyzacja modelu. Podział otoczenia wzbudnika został ukryty ze względu na czytelność obrazu. Ostateczna siatka wsadu i jego otoczenia jest gęstsza i uzależniona od głębokości wnikania pola. Do wizualizacji siatka została rozrzedzona, żeby dobrze przedstawiała przyjętą koncepcję.	82
5.15	Algorytm realizacji obliczeń z uwzględnieniem rzeczywistej geometrii stopionego wsadu.	84
6.1	Stanowisko używane do pomiaru pozycji i temperatury wsadu oraz parametrów elektrycznych. Opis oznaczeń znajduje się w tekście.	86
7.1	Układ współrzędnych i siły przyłożone do wsadu. F_z to siła wznosząca, Q_B to siła grawitacji, F_y i F_x to siła pozioma przyłożona do wsadu. . .	90
7.2	Różnica pomiędzy pionowymi składowymi (F_z) siły i grawitacji (Q_B) przyłożonej do wsadu w N, dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położen wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Wartości dodatnie, w których występuje lewitacja, zaznaczono kolorem ciemnoniebieskim .	91
7.3	$\alpha = \frac{2\Pi}{32}$	93
7.4	$\alpha = \frac{3\Pi}{32}$	93
7.5	$\alpha = \frac{4\Pi}{32}$	93
7.6	Zależności pomiędzy F_z i z_B dla $f = 30$ kHz i α od $\frac{2\pi}{32}$ do $\frac{4\pi}{32}$. Po lewej stronie każdej tabeli pokazano przekrój poprzeczny wzbudnika (zgodnie z rys. 5.2) w celu wizualizacji położenia wsadu.	93
7.7	$\alpha = \frac{5\Pi}{32}$	94
7.8	$\alpha = \frac{6\Pi}{32}$	94
7.9	Zależności pomiędzy F_z i z_B dla $f = 30$ kHz i $\alpha \frac{5\pi}{32}$ i $\frac{6\pi}{32}$. Po lewej stronie każdej tabeli pokazano przekrój poprzeczny wzbudnika (zgodnie z rys. 5.2) w celu wizualizacji położenia wsadu.	94
7.10	Całkowita moc indukowana we wsadzie (P_B) W, dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położen wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Ciemniejszy kolor odpowiada większej wartości.	96
7.11	Całkowita moc dostarczana do wzbudnika (P_T) W, dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położen wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Ciemniejszy kolor odpowiada większej wartości.	97

7.12	Sprawność dla różnych wartości częstotliwości (f), różnych położenia wsadu (z_B) i różnych wartości kąta (α). Ciemniejszy kolor odpowiada wyższej wartości.	98
8.1	Klatka numer 12 282 z kamery wideo (lewy) i wideo termowizyjnego (prawy). Jedna klatka trwała 0,008 s, więc obraz był wyświetlany 98,256 s po wprowadzeniu wsadu.	103
8.2	Szkic przekroju wzbudnika. Skrót wyjaśniono w tabeli 8.1.	104
8.3	Miejsce lewitacji wsadu. Żółta przerywana linia pokazuje medianę pozycji wsadu, a zielona przerywana linia pokazuje średnią pozycję wsadu. Czerwona przerywana linia pokazuje pozycję wsadu obliczoną na podstawie modelu obliczeniowego. Jasnoniebieska ramka pokazuje odchylenie standardowe.	105
8.4	Siła wznosząca działała na wsad (oś pozioma) w zależności od wysokości, na której znajdował się wsad (oś pionowa). Czerwona przerywana linia to siła grawitacji działająca na wsad. Ciemnoczerwony pasek na wykresie to stabilny punkt równowagi.	106
8.5	Porównanie pozycji lewitacji wsadu zaobserwowanych podczas pomiarów i obliczonych podczas symulacji. Pozycje z pomiarów są oznaczone kolorem niebieskim, a pozycje z symulacji są oznaczone kolorem czerwonym.	107
8.6	Porównanie czasów topienia wsadu dla kolejnych pomiarów z wynikami symulacji. Pomiar jest pokazany na niebiesko, a wynik symulacji jest pokazany jako czerwona przerywana linia. Jasnoniebieska ramka pokazuje odchylenie standardowe. Średnie zmierzone czasy są reprezentowane przez żółtą przerywaną linię. Czas został zmierzony na podstawie liczby klatek między wprowadzeniem wsadu a momentem osiągnięcia temperatury topienia. Częstotliwość odświeżania kamery wynosiła 125 Hz, więc dokładność pomiaru wynosiła 0,008 s, co czyni go niewidocznym na rysunku.	108
8.7	Symulacja grzania wsadu w czasie 86 s od rozpoczęcia procesu.	109
8.8	Symulacja podgrzewania wsadu i otaczającego powietrza w czasie 86 s od rozpoczęcia procesu. Widoczne są efekty konwekcji.	109
8.9	Przekrój wzbudnika z zaznaczonymi zmiennymi.	112
8.10	Przybliżenie pozycji wsadu na podstawie dwóch punktów, w których siła skierowana w górę była najbliższa sile grawitacji.	114

8.11	Przybliżenie mocy czynnej we wsadzie na podstawie znajomości stabilnej pozycji lewitacji.	114
8.12	Proces optymalizacji.	117
8.13	Sposób sprzęgnięcia algorytmu ewolucyjnego z procesem optymalizacji.	117
8.14	Początkowe wymiary wzbudnika (po lewej) i wymiary po zakończeniu procesu optymalizacji (po prawej).	121
8.15	Po lewej stronie znajduje się bazowy wzbudnik, na podstawie którego przygotowano geometrie modelu wykorzystaną w sekcji 8.1. Natomiast po prawej stronie znajduje się wzbudnik wykonany na podstawie wyników procesu optymalizacji przedstawionej w sekcji 8.2.	123
8.16	Pozycja lewitacji wsadu podczas procesu.	124
8.17	Czas topienia wsadu.	124
8.18	Geometria wzbudnika do topienia zdeformowanego wsadu.	126
8.19	Maksymalna temperatura wsadu w funkcji czasu dla wsadu w pozycji równowagi dla różnych natężeń prądu.	129
9.1	Geometria wsadu po przekroczeniu temperatury topienia dla 650 A.	131
9.2	Geometria wsadu dla wyników symulacji.	133
9.3	Proces optymalizacji ze słabym sprzężeniem zwrotnym.	135
9.4	Schemat blokowy procesu optymalizacji dla obliczeń EM-T-FD.	138
9.5	Geometria uzyskana w wyniku optymalizacji.	140

Spis tabel

2.1	Podsumowanie wybranych właściwości modeli symulacyjnych znalezionych w literaturze.	21
5.1	Długość krawędzi meshu wyrażona w metrach w zależności od materiału przypisanego do danego obszaru i częstotliwości prądu.	71
7.1	Wyniki symulacji dla różnych odchyień w kierunkach horyzontalnych	99
7.2	Wyniki symulacji grzania wsadu dla różnych natężeń prądu.	100
8.1	Parametry geometryczne wzbudnika. Graficzną reprezentację każdego symbolu przedstawiono na rys. 8.2.	103
8.2	Parametry elektryczne	105
8.3	Sprawność procesu zależy od kąta nachylenia i dolnego promienia wzbudnika. Miejsca, w których zaobserwowano lokalne optima, zaznaczono pogrubionym tekstem, a puste obszary oznaczają, że obliczenia nie zostały wykonane dla danego zestawu parametrów. Znak $\#$ oznacza, że lewitacja nie jest możliwa dla tego zestawu parametrów.	115
8.4	Parametry prądowe obu testowanych wzbudników.	123
8.5	Właściwości tytanowego wsadu użytego w symulacji.	125
8.6	Przegląd przestrzeni rozwiązań dla różnych wartości natężenia prądu i wertykalnej pozycji wsadu. Kolor zielony oznacza wartość siły wznoszącej [N] dla danego układu, natomiast czerwoną czcionką oznaczono warianty, dla których wsad nie lewituje. Na niebiesko zaznaczono komórkę, w której znajduje się pozycja najbliższa stabilnej pozycji lewitacji dla najniższego natężenia prądu.	127
9.1	Parametry materiałowe dla ciekłego aluminium.	132
9.2	Parametry modelu EM	132
9.3	Sprawność procesu dla obliczeń wielowariantowych. Na niebiesko zaznaczono optima lokalne.	137

Dodatek A

Pseudokod algorytmu ewolucyjnego

Klasa AlgorytmEwolucyjny:

```
__maksRozmiarPopulacji = 5  
__wspolczynnikMutacji = 0.1
```

Funkcja `__init__(maksRozmiarPopulacji, populacjaPoczkowa = [],
wspolczynnikMutacji = 1, maksLiczbaIteracji = 1000)`:

```
    Ustaw self.__Populacja na populacjaPoczkowa  
    Ustaw self.__maksRozmiarPopulacji na maksRozmiarPopulacji  
    Ustaw self.__wspolczynnikMutacji na wspolczynnikMutacji  
    Ustaw self.__maksLiczbaIteracji na maksLiczbaIteracji  
    Ustaw self.__czyBylNajlepszyOsobnik na Fałsz  
    Ustaw self.__najlepszyOsobnik na NaN  
    Ustaw self.__czyBylStaryNajlepszyOsobnik na Fałsz  
    Ustaw self.__staryNajlepszyOsobnik na NaN
```

Funkcja `Optymalizuj()`:

```
    Wywołaj self.__AktualizujNajlepszeRozwiazanie()  
    Dopóki self.__CzyKoniec() jest Fałsz:  
        Dla numerIteracji od 0 do self.__maksLiczbaIteracji - 1:  
            Wywołaj self.UruchomAlgorytm(self.__Populacja)  
    Zwróć self.__najlepszyOsobnik
```

Funkcja UruchomAlgorytm(populacja):

```
Ustaw self.__Populacja na populacja
Wywołaj self.__Reprodukcja()
Wywołaj self.__MutacjaPotomkow()
Wywołaj self.__Selekcja()
Zwróć self.__Populacja
```

Funkcja __Reprodukcja():

```
Posortuj self.__Populacja
Ustaw potomki na pustą listę
Dla indeks od 0 do len(self.__Populacja) - 2:
    Ustaw parametrA na średnią wartość
    self.__Populacja[indeks].PobierzParametrA() i
    self.__Populacja[indeks+1].PobierzParametrA()
    Ustaw parametrB na średnią wartość
    self.__Populacja[indeks].PobierzParametrB() i
    self.__Populacja[indeks+1].PobierzParametrB()
    Ustaw potomek na kopię głęboką self.__Populacja[indeks]
    Ustaw parametrA potomka na parametrA
    Ustaw parametrB potomka na parametrB
    Dodaj potomek do potomkow
Dodaj potomki do self.__Populacja
```

Funkcja __MutacjaPotomkow():

```
Dla indeks od self.__maksRozmiarPopulacji do len(self.__Populacja) - 1:
    Ustaw nowyParametrA na
    self.__Populacja[indeks].PobierzParametrA() + random.uniform(-
    self.__wspolczynnikMutacji, self.__wspolczynnikMutacji)
    Ustaw nowyParametrB na
    self.__Populacja[indeks].PobierzParametrB() + random.uniform(-
    self.__wspolczynnikMutacji, self.__wspolczynnikMutacji)
    Ustaw parametrA self.__Populacja[indeks] na nowyParametrA
    Ustaw parametrB self.__Populacja[indeks] na nowyParametrB
```

Funkcja __Selekcja():

```
Posortuj self.__Populacja
Wywołaj self.__AktualizujNajlepszeRozwiazanie()
Ustaw populacjaPoSelekcji na pustą listę
Dla krokPopulacji od 0 do self.__maksRozmiarPopulacji - 1:
    Ustaw indeksPopulacji na
    self.__LosowyZPopulacji(self.__Populacja)
    Dodaj self.__Populacja.pop(indeksPopulacji) do
    populacjaPoSelekcji
Ustaw self.__Populacja na populacjaPoSelekcji
```

Funkcja __LosowyZPopulacji(populacja):

```
Ustaw mianownik na 0
Dla i od 1 do len(populacja):
    Dodaj i do mianownika
Ustaw losowaLiczba na random.uniform(0, 1)
Ustaw licznik na len(populacja)
Ustaw licznikWsteczny na licznik
Dla indeksProby od 0 do len(populacja) - 1:
    Jeśli losowaLiczba < licznik / mianownik:
        Zwróć indeksProby
    Inaczej:
        Zmniejsz licznikWsteczny o 1
        Dodaj licznikWsteczny do licznika
```

Funkcja __CzyKoniec():

```
Jeśli self.__czyBylStaryNajlepszyOsobnik jest Fałsz lub
self.__staryNajlepszyOsobnik > self.__najlepszyOsobnik lub
iloscIteracji < self.__maksLiczbaIteracji/2:
    Ustaw self.__staryNajlepszyOsobnik na self.__najlepszyOsobnik
    Ustaw self.__czyBylStaryNajlepszyOsobnik na Prawda
    Zwróć Fałsz
Inaczej:
    Zwróć Prawda
```

Funkcja __AktualizujNajlepszeRozwiazanie():

```
Posortuj self.__Populacja
Ustaw najlepszyOsobnik na self.__Populacja[0]

Jeśli self.__czyBylNajlepszyOsobnik jest Fałsz:
    Ustaw self.__najlepszyOsobnik na najlepszyOsobnik
    Ustaw self.__czyBylNajlepszyOsobnik na Prawda

Ustaw wartoscNajlepszegoOsobnika na
najlepszyOsobnik.PobierzWartosc()
Ustaw wartoscStaregoNajlepszegoOsobnika na
self.__najlepszyOsobnik.PobierzWartosc()

Jeśli wartoscStaregoNajlepszegoOsobnika <
wartoscNajlepszegoOsobnika:
    Ustaw self.__najlepszyOsobnik na najlepszyOsobnik
```