

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Андрєєвої Оксани Леонідівни**  
**«Використання конвективних структур в шарах в'язкої рідини з**  
**твердими границями для гомогенізації легуючої домішки в розплаві**  
**сталі»**, що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова  
теплоенергетика

### 1. Актуальність теми дослідження

Удосконалення атомних енергоустановок йде по шляху підвищення температури та потоків нейтронів. Одна із задач, в цьому напрямі пов'язана із створенням нових конструкційних матеріалів з заданими властивостями. Так, наприклад, для активної зони атомних реакторів нового покоління конструкційні матеріали повинні мати високу радіаційну стійкість, жароміцність, низьку активацію при експлуатації. Для отримання перерахованих властивостей використовують конструкційні матеріали на основі сталі, яка містить дисперсні частинки оксидів, так звана дисперсно-зміцнена оксидами (ДЗО) сталь. Сталь містить невеликі концентрації частинок оксиду нанометрового розміру, які збагачені ітрієм, марганцем, хромом або кремнієм. Додавання цих частинок поліпшує радіаційну стійкість, міцність сталі.

Традиційна технологія отримання дисперсно-зміцненої оксидами сталі – порошкова металургія. Але вона є дорогою та трудомісткою. Альтернативний метод отримання – метод вакуумно-дугового переплаву сталей, в якому їх нагрів до температури плавлення відбувається за рахунок електричної дуги, а в розплав вводиться порошок легуючої домішки. Проте основною проблемою цього методу є проблема рівномірного розподілу легуючої домішки по об'єму розплаву. Таким чином, дослідження, які спрямовані на вдосконалення технології вакуумно-дугового переплаву сталей з метою підвищення рівномірності розподілу (гомогенізації) легуючої

*Bx 52/198*

*6 г. 11.10.2019*

домішки є актуальними. Саме цим дослідженням і присвячена дисертація Андрєєвої О. Л.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Наукові положення, висновки та рекомендації, які сформульовані у дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими і достовірними, що підтверджується опрацюванням значної кількості наукових робіт вітчизняних та закордонних вчених.

Здобувач виконав докладний огляд та аналіз відомої інформації стосовно способів отримання легованих сталей та сучасний стан в області дослідження теплофізичних процесів, що відбуваються при цьому. Було відзначено, що введення різних домішок, які додаються під час плавлення сталі, мають позитивний вплив на якість вихідного продукту. Зазначено, що максимальну гомогенізацію легуючої домішки можна отримати за рахунок її переносу в розплаві сталі внаслідок конвективної течії, що має стійку упорядковану структуру, так звані упорядковані конвективні структури. Питання формування конвективних структур досить повно вивчено для випадку вільних границь, але виникнення цих структур у разі твердих або змішаних структур вивчено недостатньо повно. Тому автором вказано на необхідність розробки науково-технічних основ гомогенізації домішок за рахунок використання упорядкованих конвективних структур з твердими границями у технологічному процесі вакуумно-дугового переплаву сталі.

Зазначається, що в багатьох роботах при дослідженні природної конвекції в нерівномірно нагрітій рідині основна увага приділялася лише повністю сформованим впорядкованим конвективним течіям. Процесам зародження конвективних структур, їх розвитку, переходу з одного в інший стан належної уваги не приділялося, особливо для випадку твердих та змішаних границь. Разом з тим розгляд таких перехідних станів дозволить не тільки встановити закономірності конвективного теплообміну на даних етапах розвитку конвективної течії і більш глибоко зрозуміти фізику самих

упорядкованих конвективних структур, але й визначити шляхи керування впорядкованими конвективними структурами в розплаві металу з метою підвищення процесу гомогенізації легуючої домішки. Міра обґрунтованості висновків дисертації відповідає вимогам поставлених задач.

### **3. Достовірність одержаних результатів**

Достовірність одержаних у роботі результатів підтверджено порівнянням результатів з експериментальними даними, а також порівнянням з результатами інших відомих авторів. Як свідчать дані, наведені у розділі 2, рівень отриманих у експериментальних даних похибок є припустимим.

Достовірність та обґрунтованість основних наукових положень дисертаційної роботи підтверджується також її апробацією на науково-практичних конференціях, публікаціями у наукових фахових виданнях, впровадженням в науково-прикладні дослідження Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» і використанням в навчальному процесі Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна на кафедрі фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології.

### **4. Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації**

Наукова новизна полягає у наступному:

1. Отримано аналітичний розв'язок стаціонарної задачі Релея для циліндричної конвективної структури (ЦКС) з твердими та змішаними граничними умовами. На основі аналізу отриманих результатів визначені умови стійкого існування ЦКС, визначено її безрозмірний діаметр. Адекватність результатів підтверджена їхньою відповідністю експериментальним даним.
2. Вперше отримана залежність числа Нуссельта від числа Релея для ЦКС з твердими границями. Це дозволило більш точно оцінювати кількість теплоти, яка переноситься ЦКС в в'язкій рідині.
3. Автором вперше доведено, що поверхневий натяг на верхній границі рідини можна розглядати як тверду границю при формуванні граничних умов

в задачі Релея. Це дозволило застосовувати рішення задачі Релея для твердих границь при аналізі та вдосконаленні процесу вакуумно-дугового переплаву сталі.

4. Вперше для випадку малої кількості легуючої домішки (до 0.02 мас. %) запропоновано та обґрунтовано підхід до конструювання катоду, що забезпечує безупинне рівномірне надходження порошку легуючої домішки у розплав та перешкоджає її накопиченню на стінках кристалізатора при вакуумно-дуговому переплаві сталі.

### **5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи**

Практичне значення полягає у наступному:

1. Удосконалено конструкція катоду вакуумної дугової печі для випадку малого вмісту легуючої домішки (до 0.02 мас. %). Отримані значення геометричних параметрів осьового отвору катоду, по нижній круговій утворюючій якого відбувається формування крапель з розплаву матеріалу катоду та легуючої домішки. Краплі потім поступають в розплав і, таким чином, забезпечується зменшення втрат легуючої домішки внаслідок її випадання на стінках кристалізатора.

2. Визначені розміри частинок нанодисперсного порошку (близько  $90 \pm 5$  нм) при яких відбувається їх просторова гомогенізація в розплаві та зменшення втрат внаслідок випадання на стінках кристалізатора.

3. Підхід, що базується на застосуванні конвективних структур, як у випадку твердих, так і у випадку змішаних границь, можна застосовувати для дослідження конвективного тепломасопереносу у горизонтальних шарах рідини у різних технічних об'єктах та технологічних процесах, на основі чого можна проводити модернізацію існуючих та розробку нових конструкцій та технологій.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» при вдосконаленні процесу виготовлення ДЗО сталей з малим відсотковим вмістом легуючої домішки на експериментальному зразку установки

вакуумно-дугового переплаву, та використовуються у навчальному процесі у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна на кафедрі фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології.

## **6. Повнота викладення результатів дисертації в публікаціях**

Основний зміст цієї роботи відображений в 16 публікаціях, в тому числі 7 статей, з яких 5 – в журналах і збірках, внесених в перелік спеціалізованих видань України, де можуть публікуватися результати дисертаційних робіт, 2 – в журналах, що індексується в наукометричній базі Scopus; 1 патент України на винахід; 7 матеріалів наукових конференцій; 1 методичний посібник для студентів.

Автореферат достатньо повно відображає основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи. Зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

## **7. Апробація результатів дисертації**

Матеріали дисертації доповідались та обговорювалися на:

- XI - XIII конференціях молодих вчених та спеціалістів ІПМаш НАН України, 2014, 2015 р., Харків, Україна;
- Міжнародній науково-технічній конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики і шляхи їх вирішення», 2014, Харків, Україна;
- Міжнародній науково-практичній конференції «Сталий енергетичний розвиток: теорія, практика, перспективи», 2015, Харків, Україна;
- International Young Science Forum on Applied Physics, YSF-2015, Dnipropetrovsk, Ukraine;
- XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції, 2016, Одеса, Україна;
- Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА», 2017, Львів, Україна;
- VI міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації», 2018, Харків, Україна.

## 8. Оформлення дисертації

Дисертація являє собою рукопис, обсягом 145 сторінок машинописного тексту, у тому числі: 102 сторінки основного тексту, 4 таблиці, 17 рисунків, 4 додатка, список використаних джерел з 112 найменувань. Дисертація складається зі вступу, основної частини з 4 розділів, висновків, додатків.

Дисертація і автореферат написані відповідно до вимог до науково-технічних текстів.

## 9. Коротка характеристика змісту роботи

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і основні завдання досліджень, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведені відомості про особистий внесок автора, апробацію, опубліковані результати, структуру та обсяг роботи.

**Перший розділ** носить оглядовий характер і присвячений узагальненню наявних теоретичних і експериментальних результатів, їхньому критичному аналізу. На основі аналізу сформульовано мету, дисертаційних досліджень.

В розділі перераховані способи отримання легованих сталей та сучасний стан в області дослідження теплофізичних процесів, що відбуваються при цьому.

Зазначено, що до теперішнього часу при дослідженні природної конвекції в нерівномірно нагрітій рідині основна увага приділялася лише визначенню параметрів циліндричних конвективних структур (ЦКС) з вільними граничними умовами. Наведено постановку задачі Релея для конвективної нестійкості в горизонтальних шарах в'язкої, нестислої рідини, що підігрівається знизу для випадку твердих граничних умов. Вказується, що такі задачі вирішувалися лише чисельними методами, тому необхідно отримати аналітичний розв'язок, за допомогою якого в подальшому досліджувати формування та стійкість ЦКС, вплив граничних умов на

діаметр ЦКС. Також, отримане аналітичне рішення дозволить визначити інтенсивність тепломасопереносу, залежність числа Нуссельта від числа Релея. Вказується, що вплив поверхневого натягу також вивчено недостатньо повно.

Окремо приділяється увага недолікам існуючих конструкцій катода вакуумно-дугової печі, які не дозволяють поліпшити гомогенізацію легуючих домішок у випадку їхньої малої концентрації. Тому в роботі буде приділено увагу і цій проблемі.

**Другий розділ** присвячено експериментальним дослідженням зародження і формування конвективних структур в горизонтальних шарах в'язкої нестисливої рідини. Було побудовано експериментальну установку та розроблено методики дослідження конвективних структур. Значна увага приділяється візуалізації процесу формування ЦКС з використанням різних речовин (масляної фарби, алюмінієвої пудри), які виконують роль дисперсної легуючої домішки. Вказується, що рідина має мати властивості однорідної суспензії. Було визначено розміри дисперсної домішки, при яких на твердих границях відбувається тертя рідини (у даному випадку оливи). Експерименти показали, що починаючи з певної температури, в рідині формуються ЦКС, кількість яких зростає з підвищенням температури нижньої поверхні ємності, до тих пір доки в проходить остаточне формування впорядкованих структур у вигляді комірок Бенара.

В **третьому розділі** автором сформовано математичну модель та отримано аналітичний розв'язок стаціонарної задачі Релея з твердими границями. Виконано порівняння отриманих результатів з результатами числових розрахунків інших авторів. Результати збігаються з високою точністю. Отримані значення безрозмірних діаметрів конвективних структур для різних граничних умов. Автором розроблено залежність числа Нуссельта від числа Релея, за допомогою якої можливе оцінювання теплопереносу в ЦКС. Адекватність отриманої залежності оцінювалась порівнянням розрахункових та експериментальних результатів для різних рідин (зокрема з

гелієм). В результаті проведеного аналізу автор довів, що задачу з поверхневим натягом на верхній границі рідини при твердій нижній границі можна розглядати як задачу Релея з твердими границями. Це дозволило, провести аналіз тепломасопереносу в ЦКС з вільною верхньою границею. Отримані результати щодо розміру ЦКС відповідають експериментальним.

В четвертому розділі автор на основі отриманих аналітичних рішень запропонував нову форму катода з циліндричною порожниною. Вперше описано просторовий розподіл швидкості рідкого металу в ЦКС з косинусоїдальним профілем нижньої частини. Визначено, що для крапель розплавленого металу катода, що надходять у розплав поблизу осі ЦКС, гомогенізація можлива при досить малому розмірі часток діоксиду цирконію. Умова такої гомогенізації - сила тяжіння та сила Стокса, що діють на частину повинні бути більшими за силу Архімеда. Встановлено, що для конвективної гомогенізації необхідно забезпечити проникнення крапель матеріалу катода в розплав по круговій лінії, яка відповідає внутрішньому колу полого катода, а самі частинки повинні мати розмір близько 90 нм. Висновки щодо розмірів частинок підтверджені експериментальними результатами по виплавці дисперсно-зміцненої оксидами сталі.

#### **10. Основні зауваження по дисертаційній роботі**

1. В розділі 2.3 порівнюються розміри частинок дисперсної фази з товщиною прикордонного шару. Проте відсутня інформація щодо оцінки товщини прикордонного шару.
2. У розділі 2.2 використовується термін однофазного середовища. З контексту роботи випливає, що більш доцільно використовувати термін «однорідне» середовище.
3. Не зрозуміло, як матеріали представлені у розд. 4 пов'язані з результатами розд. 3. Було б доцільно дати пояснення щодо визначення ліній Стокса, та як вони використовуються для розрахунку поля швидкості в ЦКС.
4. З розділу 3 не зовсім зрозуміло, як розраховувався параметр  $k_r$ .

5. На стор. 82 наведено значення безрозмірного діаметру ЦКС, проте не вказані похибки визначення цієї величини.
6. На рисунку 3.2 приведено порівняння розрахункових та експериментальних чисел Нуссельта. Видно, що при великих числах Релея є розбіжність між експериментом та теорією. В роботі не аналізуються можливі причини такої розбіжності.
7. В розд. 4 не вказано, як визначалась форма лінії танення катоду.
8. В роботі присутні орфографічні описки, є помилки в рівняннях, опису змінних рівнянь (наприклад, див. систему рівнянь 3.3, 3.4, 3.41).

Вказані зауваження не носять принциповий характер та не впливають на загальний позитивний висновок щодо дисертаційної роботи.

### **11. Загальний висновок по дисертаційній роботі**

Дисертаційна робота Андрєєвої Оксани Леонідівни «Використання конвективних структур в шарах в'язкої рідини з твердими границями для гомогенезації легуючої домішки в розплаві сталі» є завершеною науководослідною роботою, у якій на основі виконаних досліджень розв'язані наступні задачі:

- експериментально визначено вплив легуючої домішки на вид граничних умов в задачі гомогенізації;
- вперше отримано аналітичні розв'язки задачі Релея з твердими границями та досліджена їхня стійкість;
- знайдена залежність числа Нуссельта від числа Релея для в'язких нестислих рідин в режимах повзучої та ламінарної конвективних течій для ЦКС;
- експериментально і теоретично визначено вплив граничних умов на діаметр ЦКС;
- визначено характер впливу поверхневого натягу на процес тепломасопереносу в ЦКС зі змішаними граничними умовами;

– запропоновано конструкцію катоду вакуумно-дугової печі для виплавки дисперсно-зміцнених оксидами сталей та визначено розмір частинок легуючої домішки, при яких буде спостерігатися рівномірне і безперервне надходження порошку в розплав металу.

Вважаю, що за актуальністю, науковим рівнем і практичним значенням роботи, наявністю необхідної кількості й обсягу публікацій і повнотою відображення в них змісту досліджень дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому постановою Кабінету міністрів України №567 від 24.07.2013 року, а її автор Андреева Оксана Леонідівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент, доктор технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри аерокосмічної техніки Національний  
аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут» Міністерства  
освіти і науки України

Гакал П. Г.

Особистий підпис Гакал П. Г. засвідчую

Вчений секретар Національного аерокосмічного  
університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»  
канд. філос. наук, доцент



Чмихун С. Є.