

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Бозбей Людмили Сергіївни**
«Вдосконалення процесу вакуумно-дугового переплаву сталі шляхом
використання конвективної структури з вільними межами»,
що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

1. Актуальність теми дослідження

Останнім часом активно проводяться дослідження щодо отримання нових конструкційних матеріалів з заданими властивостями для енергетичних установок. 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 досить великі концентрації частинок оксиду нанометрового розміру, які збагачені ітрієм, киснем, марганцем, хромом або кремнієм. 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 домішки є актуальними. Саме цим дослідженням і присвячена дисертація Бозбей Л. С.

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 можна забезпечити максимальну гомогенізацію легуючої домішки за рахунок її переносу в розплаві сталі внаслідок конвективної течії, що має стійку упорядковану структуру. Вказано на необхідність розробки науково-технічних основ використання упорядкованих конвективних структур у технологічному процесі вакуумно-дугового переплаву сталі для підвищення гомогенізації легуючої домішки. Виділено можливі форми упорядкованих конвективних структур, які можуть перебувати в стійкому стані протягом тривалого проміжку часу, – комірки Бенара.

Слід зазначити, що до теперішнього часу 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. 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 у вигляді комірок Бенара і конвективних валів, 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. Вперше експериментальним шляхом встановлено, що на перехідних етапах у горизонтальних шарах рідини, що рівномірно підігрівається знизу, з вільними граничними умовами, формуються однакові стійкі конвективні структури циліндричної форми, які названо елементарними конвективними комірками (ЕКК). Їх кількість зростає із збільшенням температури нижньої межі шару, а розміри та форма залишаються незмінними.

2. Вперше отримані нові аналітичні вирази для швидкості течії та збурення (відхилення величини від аналогічної у стані механічної рівноваги) температури у циліндричній ЕКК.

3. Вперше теоретично отримано значення безрозмірного (віднесеного до товщини шару) діаметру ЕКК для шару з вільними межами, що дорівнює 3,44.

4. Вперше запропоновано здійснювати гомогенізацію частинок легуючої домішки за рахунок її переносу в розплаві сталі внаслідок конвективної течії, що має стійку упорядковану структуру, при безупинному рівномірному надходженні легуючої домішки у розплав металу.

5. Запропоновано новий методологічний підхід до конструювання катоду, що забезпечує безупинне рівномірне надходження порошку легуючої домішки у розплав при вакуумно-дуговому переплаві сталі.

5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Практичне значення полягає у наступному:

1. Вдосконалена конструкція катоду вакуумної дугової печі. Отримані значення геометричних параметрів порожнин катоду, що містять порошок діоксиду цирконію, при яких забезпечується його безупинне рівномірне надходження у розплав.

2. Визначені розміри частинок нанодисперсного порошку ZrO_2 , при яких відбувається їх просторова гомогенізація у процесі отримання ДЗО сталі 08X18H10T.

3. Підхід, що базується на застосуванні елементарних конвективних комірок, 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 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 6 статей, з яких 3 – в журналах і збірках, внесених в перелік спеціалізованих видань України, де можуть публікуватися результати дисертаційних робіт, 1 – в закордонному журналі, що індексується в наукометричній базі Scopus, 2 – в інших журналах; 1 патент України на винахід; 8 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:

- X конференція молодих вчених та спеціалістів ІПМаш НАН України, 2013 р., Харків, Україна;
- International conference MSS-14 «Mode conversion, coherent structures and turbulence», Moscow, Russia, 2014;
- IV Міжгалузева науково-практична конференція «Інноваційні шляхи модернізації базових галузей промисловості, енерго- і ресурсозбереження, охорона навколишнього природного середовища», 25–26 березня 2015 р., Харків, Україна;
- Міжнародна наукова-практична конференція «Стійкий енергетичний розвиток: теорія, практика, перспективи», 2015 р., Харків, Україна;
- XII конференція молодих вчених та спеціалістів; ІПМаш НАН України, 2015 р., Харків, Україна;

- International. Young Scientists Forum on Applied Physics YSF–2015, 2015, Dnipropetrovsk, Ukraine;
- XI International Scientific Conference: Electronics and Applied Physics, Oct. 21–24, 2015, Kyiv, Ukraine;
- XVII Міжнародна наукова-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 29–30 вересня 2016 р., Київ, Україна.

8. Оформлення дисертації

Дисертація являє собою рукопис, обсягом 140 сторінок машинописного тексту, у тому числі 101 сторінка основної текстової частини. Дисертація складається зі вступу, основної частини, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 117 найменувань та 4 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.

У **першому розділі** розглянуто 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 повністю сформованим впорядкованим конвективним течіям. Процесам зародження конвективних структур, їх розвитку, переходу з одного стану в

інший належної уваги не приділено. 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 у вигляді комірок Бенара і конвективних валів, але й визначити шляхи керування впорядкованими конвективними структурами в розплаві металу з метою підвищення процесу гомогенізації легуючої домішки.

Другий розділ присвячено експериментальним дослідженням зародження і розвитку упорядкованих конвективних структур в горизонтальних шарах в'язкої нестисливої рідини. Було побудовано експериментальну установку та розроблено методики вимірювання швидкості рідини в елементарній конвективній комірці (ЕКК). На установці були отримані результати по формуванню комірок Бенара в шарі рідини.

В **третьому розділі** сформовано математичну модель конвективного тепло переносу в циліндричній ЕКК з вільними межами. Диференційні рівняння, які описують закони збереження, записані у вигляді системи рівнянь Нав'є–Стокса, енергії і нерозривності в наближенні Бусінеска. Це дозволило отримати аналітичні вирази для рішень системи диференціальних рівнянь.

Отримано аналітичні вирази для швидкості і температури в ЕКК, радіуса елементарної конвективної комірки. Адекватність математичної моделі підтверджена зіставленням теоретично розрахованих значень радіуса ЕКК з експериментальними даними по впорядкованим конвективним структурам в горизонтальному шарі оливи, що підігрівається знизу і наявними даними по руйнуванню супергранул на Сонці. Сформульовано і теоретично обґрунтовано енергетичний принцип формування повторюваних конвективних структур в шарі в'язкої нестисливої рідини при її рівномірному підігріві знизу.

В **четвертому розділі** встановлено, що у розплаві металу при вакуумно-дуговому переплаві сталі виникає конвективна структура, подібна

ЕКК, яка займає весь об'єм розплаву, та у якій спостерігається висхідна течія у центрі і спадна – на периферії.

Запропоновано конструкцію катода вакуумної дугової печі для отримання ДЗО сталі, що забезпечує безупинне рівномірне надходження порошку легуючої домішки в об'єм розплавленого металу. Розроблено методику визначення конструктивних параметрів катода.

Методику моделювання теплофізичних процесів в ЕКК адаптовано до випадку вільно-конвективної течії в розплаві металу, що має циліндричну форму з неплоским дном, яка відповідає поверхні розділу фаз. Описано просторовий розподіл конвективного масопереносу рідкого металу в розплаві, що має форму конвективної комірки, що знаходиться над твердою фазою сталі. При цьому враховується неплоский профіль поверхні розділу фаз. Отримано вираз для визначення максимально допустимого розміру частинок легуючої домішки, при якому забезпечується її однорідний розподіл по всьому об'єму розплаву внаслідок конвективної течії.

10. Основні зауваження по дисертаційній роботі

1. У підрозділі 1.3 розглянуто перші експериментальні дослідження конвективних структур у шарі в'язкої рідини, що рівномірно підігрівається знизу. Однак, не наведено нових експериментальних досліджень по цій тематиці, крім посилання на монографію Е. Кошмідера. Тому бажано було б в літературному огляді проаналізувати більше робіт по даній тематиці.
2. У розділі 2.2 відсутні дані про температуру вакуумної оливи, хоча значення цих параметрів вказано раніше. Для спрощення ознайомлення з матеріалом треба було б їх повторно вказати в цьому розділі.
3. У розділі 2.5 описані експерименти щодо дослідження руйнування елементарних конвективних комірок у горизонтальному шарі в'язкої нестисливої рідини. Незрозуміло, як це у подальшому застосовується для виготовлення ДЗО сталей.

4. На рисунку 2.5. (підрозділу 2.5) наведені етапи руйнування конвективної комірки мікрокаплею вакуумної оливи. Однак, не зрозуміло як довго мікрокапля оливи рухається по поверхні комірок.
5. У підрозділі 2.6. описується формування повітряних комірок у багатошаровому середовищі, що рухається. Бажано було б надати інформацію щодо часу існування цих повітряних комірок.
6. На рисунку 3.4 (підрозділу 3.5) зображені моменти потужного сонячного спалаху. Треба було б конкретизувати механізм руйнування конвективних комірок, які описано у підрозділі 2.5.
7. В роботі присутні орфографічні описки, є помилки в описі рисунків (наприклад рис. 2.3).

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

11. Загальний висновок по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Бозбей Людмили Сергіївни «Вдосконалення процесу вакуумно-дугового переплаву сталі шляхом використання конвективної структури з вільними межами» є завершеною науково-дослідною роботою, у якій на основі виконаних досліджень розв'язані наступні задачі:

- визначено характер конвективної течії у розплаві сталі при її вакуумно-дуговому переплаві;
- експериментальним і розрахунковим шляхом визначено характерні параметри стійких циліндричних конвективних структур;
- досліджено конвективну течію розплаву сталі у циліндричних конвективних структурах з конічним та синусоїдально поглибленим профілем дна та вільними граничними умовами;
- запропоновано структуру катода, що забезпечує безупинне надходження порошку легуючої домішки у розплав при вакуумно-дуговому переплаву сталі;

– визначено розміри частинок порошку діоксиду цирконію, що знаходяться в об'ємі розплавленого металу;

– розроблено рекомендації щодо вдосконалення процесу гомогенізації легуючої домішки у розплаві сталі.

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 Бозбей Людмила Сергіївна 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
аерокосмічний 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.