

Національна академія наук України
Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного

АНДРЕЄВА ОКСАНА ЛЕОНІДІВНА



УДК 536.25

**Використання конвективних структур в шарах в'язкої рідини з твердими
границями для гомогенізації легуючої домішки в розплаві сталі**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика и промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у відділі моделювання та ідентифікації теплових процесів Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор технічних наук, член-кор. НАН України
Костіков Андрій Олегович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
заступник директора з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Гакал Павло Григорович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М. Е. Жуковського «Харківський авіаційний
інститут»,
Міністерство освіти і науки України,
завідувач кафедри аерокосмічної техніки

кандидат технічних наук, доцент
Кошельнік Олександр Вадимович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
Міністерство освіти і науки України,
доцент кафедри теплотехніки та енергоефективних
технологій

Захист відбудеться « 24 » жовтня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського , 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського , 2/10 та на веб – сайті інституту за адресою: <http://ipmach.kharkov.ua/> спеціалізована-вчена-рада-д-64-180-02/

Автореферат розісланий « 16 » вересня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02
кандидат технічних наук, с. н. с.

С. В. Альохіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З розвитком атомної енергетики постає питання підвищення коефіцієнта корисної дії атомних реакторів. Одним із шляхів такого підвищення є перехід до реакторів IV покоління, де планується використовувати підвищені температури (до 900 °С) і великі потоки нейтронів. Тому останнім часом достатньо активно проводяться наукові дослідження, присвячені створенню нових конструкційних матеріалів для таких атомних енергетичних установок. Крім високих температур і потоків нейтронів, конструкційні матеріали, що мають працювати в активних зонах атомних реакторів нового покоління, повинні мати високу жароміцність та низьку активацію при експлуатації. Як показує практика, до таких стійких конструкційних матеріалів можна віднести дисперсно-зміцнені оксидами (ДЗО) сталі.

ДЗО сталі містять досить невеликі концентрації легуючих частинок нанометрового розміру з вмістом оксидів ітрію, марганцю, хрому або кремнію. Як показують дослідження, додані частинки поліпшують радіаційну стійкість та збільшують міцність сталі, що обумовлено закріпленням на них дислокацій.

До теперішнього часу традиційною технологією отримання ДЗО була технологія порошкової металургії. Але більш легким за технологією отримання і більш економічним є альтернативний метод отримання ДЗО сталей – метод вакуумно-дугового переплаву, де розплавлення сталевого катода відбувається за рахунок електричної дуги, а легуюча домішка у вигляді нанорозмірного порошку розташовується в катоді, і вводиться в розплав разом із краплями вихідного металу.

Основною проблемою цього методу є необхідність забезпечення рівномірного розподілу легуючої домішки по об'єму розплаву. Нещодавно з'явилися роботи, що присвячені вирішенню цієї проблеми шляхом утворення конвективних структур при значній кількості легуючої домішки. При такій кількості легуючої домішки суспензія, яку вона утворює з розплавом металу, проковзує по прошарку чистого металу, що розташований в приграничному шарі поблизу стінок кристалізатора, тобто там відсутні дотичні напруження в рідині. При незначній кількості легуючої домішки розплав металу стає однорідним і відбувається тертя рідини в конвективній структурі об тверду стінку. Тобто конвективна структура має не вільні, а тверді границі. При цьому розроблений раніше математичний апарат для конвективних структур з вільною поверхнею перестає працювати.

Тому дослідження, що спрямовані на забезпечення гомогенізації оксидної фази конструкційних сталей за рахунок використання впорядкованих конвективних структур в шарах в'язкої, нестисливої рідини з твердими границями є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Результати, які лягли в основу цієї дисертації, отримані під час виконання наукових досліджень, що проводилися у відділі моделювання і ідентифікації

теплових процесів Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України у рамках бюджетних тем: «Розробка теоретичних основ та методів реалізації теплових процесів в об'єктах паливно-енергетичного комплексу та житлово-комунального господарства з метою енергоресурсозбереження та заміщення вуглеводневого палива» (№: III-40-10, № держреєстрації 0110U002658, 2010-2014); «Моделювання, ідентифікація і оптимізація теплових процесів в об'єктах енергетики з метою вирішення завдань енергоресурсозбереження і підвищення надійності їх роботи» (№ III-66-15, № держреєстрації 0115U001091, 2015-2019), де автор був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка науково-технічних основ використання упорядкованих конвективних структур з твердими границями у технологічному процесі вакуумно-дугового переплаву сталі для підвищення гомогенізації легуючих добавок.

Для реалізації поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- експериментально визначити вплив легуючої домішки на вид граничних умов в задачі гомогенізації легуючої домішки при виготовленні дисперсно-зміцнених оксидами сталей;
- отримати розв'язки задачі Релея з твердими границями і дослідити їх стійкість;
- знайти залежність числа Нуссельта від числа Релея для в'язких нестисливих рідин в режимах повзучої і ламінарної конвективних течій для циліндричних конвективних структур;
- експериментально і теоретично визначити вплив виду граничних умов на діаметр циліндричної конвективної структури;
- визначити характер впливу поверхневого натягу на процес тепломасопереносу в циліндричній конвективній структурі зі змішаними граничними умовами;
- запропонувати конструкцію катода вакуумно-дугової печі для виплавки дисперсно-зміцнених оксидами сталей, і визначити розмір частинок легуючої домішки, при яких буде спостерігатися рівномірне і безперервне надходження порошку в розплав металу.

Об'єктом дослідження є конвективні процеси у шарах в'язких нестисливих рідин з твердими границями та змішаними граничними умовами, що підігріваються знизу.

Предметом дослідження є математичні і фізичні моделі опису конвективних процесів у шарі в'язкої нестисливої рідини з твердими границями та змішаними граничними умовами, що підігрівається знизу.

Методи дослідження: теорія конвективної стійкості нестисливої рідини, методи математичного моделювання, аналітичні методи розв'язування задач, що описуються диференційними рівняннями у частинних похідних, методи фізичного моделювання на лабораторних установках, методи статистичної обробки експериментальних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше отримані аналітичні розв'язки стаціонарної задачі Релея для циліндричної конвективної структури у разі як твердих границь, так і у випадку змішаних граничних умов, аналіз яких дозволив знайти основні закономірності протікання фізичних процесів в таких структурах, визначити умови їх стійкого існування та теоретично розрахувати значення безрозмірного діаметра конвективної структури (дорівнює 2,46 у разі твердих границь), яке порівнювалося з експериментальними даними для обґрунтування адекватності використаних математичних моделей і розв'язків.

2. Вперше отримана нова критеріальна залежність числа Нуссельта від числа Релея для стійкої циліндричної конвективної структури з твердими границями, що дає можливість підвищити точність розрахунку кількості тепла, яке переноситься конвективною структурою у в'язкій рідині.

3. Вперше показано, що в задачі Релея наявність поверхневого натягу на верхній границі шару рідини дозволяє на цій поверхні розглядати такі граничні умови, як і на твердій границі, що дозволило застосувати аналітичні розв'язки задачі Релея з твердими границями при аналізі і вдосконаленні процесу вакуумно-дугового переплаву сталі.

4. Для випадку малої кількості легуючої домішки (до 0,02 мас. %) вперше запропоновано новий методологічний підхід до конструювання катоду, який забезпечує безперервне надходження порошку легуючої домішки в розплав металу і перешкоджає її накопиченню на стінках кристалізатора.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Удосконалено конструкцію катода вакуумно-дугової печі для випадку малого відсоткового вмісту легуючої домішки (до 0,02 мас. %). Отримано значення геометричних параметрів його осьового отвору, по круговій утворюючій нижній частині якого відбувається проникнення крапель розплавленого катоду з порошком в розплав, що приводить до зниження його втрат на стінках кристалізатора.

2. Визначено розміри частинок нанодисперсного порошку (близько 90 ± 5 нм), при яких спостерігається їх просторова гомогенізація в розплаві і зменшення втрат на стінках кристалізатора в процесі отримання дисперсно-зміцненої оксидами сталі.

3. Підхід, заснований на застосуванні конвективних структур як з твердими границями, так і зі змішаними граничними умовами в горизонтальних шарах рідини можна використовувати для дослідження конвективного тепломасопереносу в різних технічних об'єктах і технологічних процесах з метою вдосконалення існуючих або розробки нових конструкцій і технологій.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України при вдосконаленні процесу виготовлення дисперсно-зміцнених оксидами сталей з малим відсотковим вмістом легуючої домішки на

експериментальному зразку установки вакуумно-дугового переплаву, а також використовуються в навчальному процесі в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна на фізико-енергетичному факультеті.

Особистий внесок здобувачки. Усі основні результати роботи, які виносяться на захист, отримані автором особисто.

В роботах [1, 9] здобувачка провела серію експериментів щодо формування і дослідження властивостей конвективної структури з твердими границями і змішаними граничними умовами в шарі в'язкої, нестисливої рідини, що рівномірно підігрівається знизу. В цих роботах експериментально досліджено співвідношення діаметра ЦКС до глибини шару при наявності твердих, або змішаних граничних умов.

В роботах [5, 6, 7] здобувачка провела теоретичні дослідження циліндричної конвективної структури з твердими границями і змішаними граничними умовами, де вона отримала аналітичний розв'язок задачі Релея з твердими і змішаними граничними умовами.

В роботі [2, 8] здобувачкою була проведена робота по систематизації, узагальненню експериментальних даних, та виконано розрахунки параметрів катодного витрачуваного електрода типу "hollow fish - bone" для вакуумно-дугового переплаву нержавіючої сталі.

В роботах [4, 14] здобувачкою розв'язана задача, щодо дослідження властивостей циліндричних ЦКС зі змішаними граничними умовами при врахуванні поверхневого натягу. Нею особисто запропонований інший спосіб завдання граничних умов, заснований на вимозі виконання динамічної граничної умови, яка може бути отримана з рівняння Нав'є-Стокса інтегруванням по тонкому граничному прошарку поблизу вільної границі рідини. В цьому випадку граничні умови враховують здатність деформування і поверхневий натяг вільної поверхні конвективної структури.

В роботах [15] здобувачкою запропоновано розглядати процес вакуумно-дугового переплаву сталі 08X18H10T + ZrO₂ на основі процесів, що відбувається в шарі в'язкої нестисливої рідини, що підігрівається зверху (знизу), за умови, що в розплавленому металі формується ЦКС з вільними граничними умовами. Вона особисто дослідила процес гомогенізації порошку діоксиду цирконію при вакуумно-дуговому виготовленні реакторних сталей. Нею запропоновано здійснювати процес гомогенізації в конвективній структурі з неплоским профілем дна і змішаними граничними умовами, який формується при переплаві сталі з застосуванням катоду з поперечним перерізом типу «hollow fish-bone». Вона особисто проаналізувала вплив форми катоду, розміру легуючих частинок, масопереносу в конвективній структурі на рівномірність розподілу діоксиду цирконію в розплаві сталі.

В роботах [3, 10] здобувачкою була фізично обґрунтована і отримана в аналітичному вигляді залежність числа Нуссельта від числа Релея на стадії, що передуює виникненню турбулентного режиму конвекції. Вона показала, що на цій стадії число Нуссельта описується статечним законом залежно від числа Релея, що містить п'ять констант. Одна константа однакова для всіх

рідин, і є критичним числом Релея, а решта - строго індивідуальні для кожного виду рідини.

В роботах [12, 13] здобувачкою розглянула задачу про теплову конвекцію в'язкої нестисливої рідини в циліндричній ЦКС з конічно поглибленим дном і твердими граничними умовами, де отримала модельні розподіли ліній струму Стокса і збуреної температури в об'ємі структури.

В роботі [11] здобувачка теоретично дослідила теплоперенос в конвективних циліндричних структурах з параболічним профілем дна і твердими граничними умовами.

В роботі [16] здобувачкою запропонована теоретична модель опису комірок Бенара з твердими границями та знайдено аналітичне рішення лінійної стаціонарної задачі Релея з невільними граничними умовами. Вона особисто експериментально показала, що в структурі зі змішаними граничними умовами зі збільшенням температури дна ємності спочатку з'являються не дотичні один до одного і однакового діаметру циліндричні структури. Потім їх кількість збільшується аж до повного заповнення ними об'єму оливи, а границя розділу між структурами набуває форми багатокутника.

Апробація результатів роботи. Основні матеріали і результати роботи докладалися на наступних конференціях: XI - XIII конференція молодих вчених і спеціалістів ІПМаш НАН України (Харків, 2014, 2015, Україна); міжнародна науково-технічна конференція «Фізико-технічні проблеми енергетики і шляхи їх вирішення» (Харків, 2014, Україна); міжнародна науково-практична конференція «Сталий енергетичний розвиток: теорія, практика, перспективи» (Харків, 2015, Україна,); International Young Science Forum on Applied Physics (YSF-2015, Dnipronetrovsk, Ukraine); XVI всеукраїнська науково-технічна конференція (Одеса, 2016, Україна); міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (Львів, 2017, Україна), VI міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми інформатизації" (Харків, 2018, Україна).

Публікації. 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, індексованих в наукометричній базі Scopus), 1 патент України на винахід, 7 робіт – матеріали наукових конференцій, 1 методичний посібник для студентів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, додатків. Повний обсяг роботи становить 145 сторінок, з них 102 сторінки основного тексту, 4 таблиці, 17 рисунків, 4 додатка, список використаних джерел (114 найменувань на 12 сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, наведені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету, завдання і основні задачі дослідження, надано опис використаних в дисертації методів дослідження та охарактеризована їх достовірність, визначено наукову новизну і сформульовано практичне значення отриманих дисертантом результатів, визначено особистий вклад здобувачки, і надана інформація щодо апробації результатів роботи та наведено список публікацій у спеціалізованих наукових виданнях за тематикою дисертації.

У **першому розділі** розглянуто практичне використання конвективних структур в шарах в'язкої, нестисливої рідини, що розташована між двома горизонтальними теплопровідними масивами. Розглянуто способи виробництва конструкційних сталей та обговорено проблеми, що виникають при використанні кожного з них. Вказано, що перевага віддається тому способу виробництва, який дозволяє отримати сталь необхідного складу і високої якості при меншій її собівартості. Визначено, що для проектування перспективних ядерних і термоядерних енергетичних установок необхідні конструкційні матеріали, які характеризуються високою радіаційною та термічною стійкістю, а також низькою активацією при експлуатації. Одним із способів створення таких конструкційних матеріалів є розробка методів виготовлення (ДЗО) сталей. Показано, що з усіх розглянутих способів виробництва ДЗО сталей найбільш перспективним є вакуумно-дугова плавка ДЗО сталей. ДЗО сталі містять легуючі частинки нанометрового розміру, які збагачені, наприклад, оксидами ітрію, марганцю, хрому або кремнію. Такі нанодисперсні частинки відіграють важливу роль у збільшенні міцності та радіаційної стійкості ДЗО сталей.

Експериментально перевірено методом отримання ДЗО сталей є вакуумно-дуговий переплав циліндричної заготовки сталі, в рівномірно розподілених отворах об'єму якої розміщуються певні маси легуючих домішок нанодисперсного порошку оксидів металів. Однак експериментально показано, що якість ДЗО сталі залежить від рівномірності просторового розподілу легуючих частинок.

Зазначено, що в процесі вакуумно-дугового переплаву сталі в мідному кристалізаторі формується циліндрична конвективна структура (ЦКС) зі змішаними граничними умовами, а поперечний переріз нижньої границі ЦКС може бути близьким до конічного або синусоїдального.

Зроблено висновок, що для забезпечення максимальної гомогенізації легуючої домішки необхідно використовувати конвективні процеси в ЦКС з плоскими та неплоскими поперечними перерізами нижньої границі, форма якої впливає на характеристики конвективного руху розплавленого металу.

Вказано на необхідність розробки науково-технічних основ використання упорядкованих конвективних структур з твердими границями та змішаними граничними умовами для підвищення гомогенізації легуючої домішки у

технологічному процесі вакуумно-дугового переплаву сталі у разі малої кількості легуючої домішки, оскільки існуючі підходи в цьому випадку призводять до скупчення її частинок на стінках кристалізатору.

Наведено огляд публікацій вітчизняних і зарубіжних авторів щодо аналізу результатів експериментального і теоретичного дослідження впорядкованих конвективних структур, які виникають в нерівномірно розігрітій у вертикальному напрямі рідині, що знаходиться в гравітаційному полі, та має тверді границі, або змішані граничні умови. Вагомий внесок в цю тематику досліджень зробили Rumford C., Thomson J., Бенар А., Релей, Chandrasekhar S., Гершуни Г. З., Koschmieder E. L., Гетлинг А. В., Ткаченко В. І. та інші.

Виходячи з огляду їх робіт сформульована задача дослідження виникнення нестійкості в горизонтальних шарах в'язкої, нестисливої рідини, що підігрівається знизу, яку можна назвати задачею Релея с твердими границями. Вказано, що ця задача не має аналітичного розв'язку, а вирішується лише із залученням числових методів.

На базі проведеного аналізу сформульовано мету та постановку нових задач дослідження.

Другий розділ присвячено експериментальному дослідженню формування конвективних структур у шарі в'язкої нестисливої рідини, що підігрівається знизу, при наявності тертя рідини о стінки. В розділі визначені основні завдання з експериментального дослідження формування ЦКС. Для виконання цих завдань був створений лабораторний стенд експериментальної установки, та розроблено методики вимірювання параметрів ЦКС. В якості в'язкої, нестисливої рідини використовувалась вакуумна олива VM-5, а візуалізація конвективних структур здійснювалась за допомогою невеликої кількості алюмінієвої пудри або масляної фарби, що додавалась до оливи.

Експериментально встановлено, що в однофазних суспензіях рідини можуть реалізуватися тверді границі або змішані граничні умови. Для підтвердження цього були проведені досліди з дисперсними фазами, частинки яких мають різні геометричні розміри.

На рис. 1 наведені отримані на мікроскопі МБС - 9 мікрофотографії вакуумної оливи VM - 5 з додаванням в 2 мл оливи масляної фарби в кількості 0,05 г (рис. 1, а) або алюмінієвої пігментної пудри ПАП-1 в кількості 0,005 г (рис. 1, б).

Експерименти показали, що додавання у в'язку нестисливу рідину в певній кількості дисперсної фази різної природи може формувати на твердих стінках умови, що відповідають як проковзуванню рідини по плівці прикордонного прошарку, так і тертю рідини о ці стінки. Іншими словами, таким чином можна реалізувати або вільні граничні умови, або граничні умови, що відповідають твердим границям, або змішані граничні умови.

Проведено експериментальне дослідження формування конвективних структур в оливі з додаванням масляної фарби або алюмінієвої пудри.

На рис. 2 показані світлини циліндричних ЦКС у вакуумній оливі з додаванням масляної фарби. Вимірний діаметр ЦКС варіювався в інтервалі 2,4–2,5 мм. В цьому випадку реалізовувалися змішані граничні умови (на дні ємності – тверда границя, на верхній границі шару рідини – вільна поверхня).



Рис. 1 Розподіл часток дисперсної фази у вакуумній оливі:
а) – додавання у оливу масляної фарби; б) – додавання у оливу алюмінієвої пудри

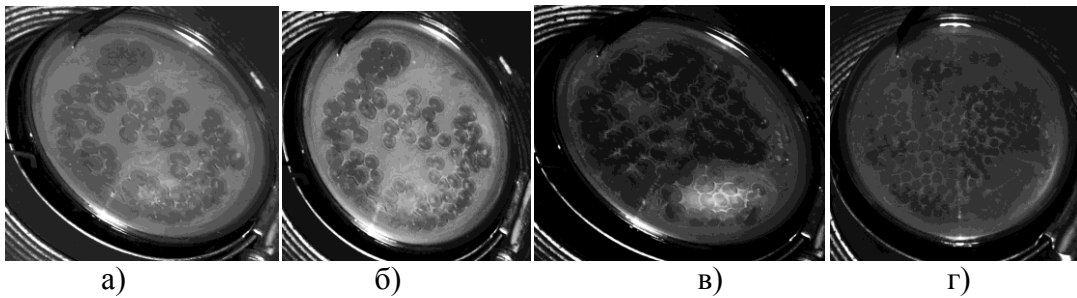


Рис. 2 Зміна кількості ЦКС в оливі з додаванням масляної фарби при зміні температури верхньої границі оливи і дна ємності:
а) – 81 °С і 91 °С; б) – 85 °С і 96 °С; в) – 92 °С і 110 °С; г) – 97 °С і 110 °С

На рис. 3 показані світлини циліндричних ЦКС в вакуумній оливі з додаванням алюмінієвої пудри. За рахунок накривання ємності прозорим склом і шляхом підбору відповідної кількості дисперсної домішки на верхній і нижній границях шару рідини формувалися тверді границі. Вимірний діаметр ЦКС при цьому варіювався в інтервалі 2,6–2,7 мм.

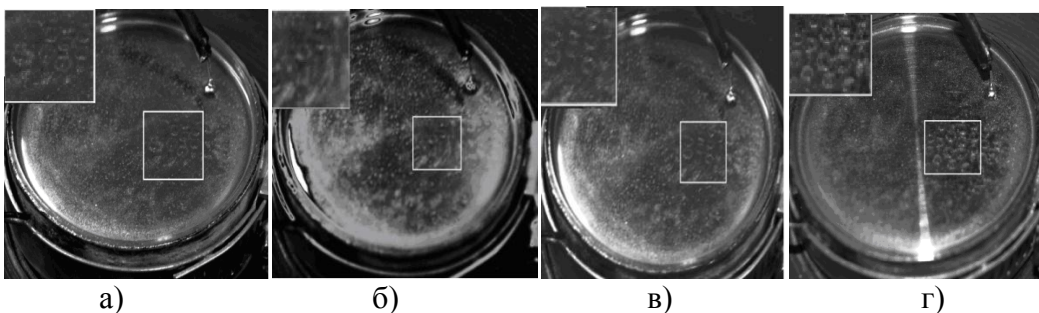


Рис. 3 Зміна кількості ЦКС у вакуумній оливі з додаванням алюмінієвої пудри при зміні температури верхньої границі масла і дна ємності:
а) – 84 °С і 113 °С; б) – 87 °С і 118 °С; в) – 92 °С і 122 °С; г) – 95 °С і 126 °С

Проведені експериментальні дослідження показали, що кількість ЦКС зі збільшенням температури дна циліндричної ємності зростає, починаючи від однієї – двох структур і закінчуючи щільною упаковкою їх в ємності зі зміною циліндричної форми на призматичну. В результаті на поверхні оливи утворюються багатокутники, що формують, в кінці кінців, впорядковану гексагональну структуру у вигляді комірок Бенара.

Третій розділ дисертації присвячено математичному моделюванню тепломасопереносу в ЦКС з твердими границями

Розглянемо горизонтальний нескінченний шар в'язкої рідини розташований так, що вісь \tilde{z} спрямована вгору перпендикулярно до границь $\tilde{z} = 0$ і $\tilde{z} = h$. Температури верхньої границі T_1 і нижньої T_2 підтримуються незмінними, при цьому $T_1 < T_2$. Вважаємо, що в стані механічної рівноваги (відсутності руху рідини внаслідок конвекції) температура рідини залежить тільки від вертикальної координати \tilde{z} .

Зазвичай при моделюванні вільноконвективного тепломасопереносу в таких шарах використовують систему, що складається з рівнянь Нав'є–Стокса, нерозривності та балансу енергії. Відомо, що у випадку вільної конвекції доцільно замість невідомих швидкості, температури, та тиску розглядати величини їх збурень, тобто відхилення цих величин від аналогічних, що спостерігаються у стані механічної рівноваги. Це дає змогу, застосувавши наближення Бусінеска та деякі математичні перетворення, звести цю систему до безрозмірних диференційних рівнянь, які в проекції на вертикальну вісь \tilde{z} записуються у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta v_z = \Delta \Delta v_z + \text{Ra} \Delta_{\perp} T, \quad (1)$$

$$\text{Pr} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + v_z, \quad (2)$$

де v_z – вертикальна компонента збурення швидкості; T – збурення температури; Ra , Pr – числа Релея і Прандтля; Δ – оператор Лапласа; Δ_{\perp} – його складова без другої похідної у вертикальному напрямі.

Для обезрозмірювання використані такі одиниці виміру: довжина – товщина шару h ; час – $h^2 \nu^{-1}$; температура – $\Theta = T_2 - T_1$. У цьому випадку безрозмірна координата z змінюється в інтервалі від 0 до 1.

Зазначимо, що у плоскому горизонтальному шарі у випадку механічної рівноваги рух рідини відсутній, тому величина збурення швидкості співпадає з величиною швидкості, і в подальшому відносно швидкості термін «збурення» будемо опускати.

Оскільки експериментальні дані свідчать про циліндричну форму конвективних структур, що розглядаються, для моделювання конвективного руху в ЦКС будемо розглядати рівняння (1), (2) у циліндричній системі координат (r, ϕ, z) . При цьому внаслідок осьової симетрії всі похідні по кутовій координаті ϕ дорівнюють нулю.

Рівняння неперервності в цьому випадку має вигляд

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Граничні умови сформулюємо таким же чином, як це робиться у відомих з літератури задачах, де використовується декартова система координат. Вочевидь, що збурення температури і вертикальної компоненти швидкості на верхній і нижній границях ЦКС відсутні.

$$T|_{z=0} = 0, \quad T|_{z=1} = 0, \quad (4)$$

$$v_z|_{z=0} = 0, \quad v_z|_{z=1} = 0. \quad (5)$$

Також враховуємо тертя рідини об ці тверді границі, тобто вимагатимемо рівність нулю на них радіальної компоненти швидкості. Тоді, використавши рівняння неперервності, на цих границях можна отримати граничні умови для вертикальної компоненти швидкості.

$$\left. \frac{\partial v_z}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial v_z}{\partial z} \right|_{z=1} = 0. \quad (6)$$

Після розв'язання системи рівнянь (1), (2) з граничними умовами (4) – (6) радіальну компоненту швидкості v_r можна безпосередньо знайти з рівняння (3).

Задачі вільної конвекції в горизонтальному шарі нестисливої, в'язкої рідини з твердими границями до теперішнього часу розв'язувалися лише числовими методами. Здобувачкою отримано аналітичні розв'язки задачі (1) – (6).

Частинними розв'язками рівнянь (1), (2) є функції виду

$$v_z(t, r, z) = v(z) \cdot J_0(k_r r) \cdot \exp(-\lambda t), \quad (7)$$

$$T(t, r, z) = \mathcal{G}(z) \cdot J_0(k_r r) \cdot \exp(-\lambda t), \quad (8)$$

де $v(z)$ і \mathcal{G} – амплітуди збурень вертикальної швидкості і температури відповідно; λ – власні числа, що характеризують загасання ($\lambda > 0$); наростання ($\lambda < 0$) або незмінність ($\lambda = 0$) у часі збурень; $J_0(x)$ – функція Бесселя першого роду нульового порядку від аргументу x ; k_r – радіальне хвильове число, що характеризує залежність збурень від поперечної координати r .

Виходячи з (7), (8) показано, що амплітуда вертикальної швидкості має вигляд

$$v(z) = A \left[1 - ch\left((z - z_0) X_+\right) ch^{-1}\left(z_0 X_+\right) \right] \sin\left(z \sqrt{a - b}\right), \quad (9)$$

а амплітуда збурення температури

$$\mathcal{G}(z) = -\frac{1}{\sqrt{b}} \int_0^z v(\xi) sh\left(\sqrt{b}(\xi - z)\right) d\xi + \frac{1}{\sqrt{b}} \frac{sh\left(z\sqrt{b}\right)}{sh\left(\sqrt{b}\right)} \int_0^1 v(\xi) sh\left(\sqrt{b}(\xi - 1)\right) d\xi, \quad (10)$$

де $X_{\pm} = \left[0.5 \left(\sqrt{\chi^2 + 0.75a^2} \pm \chi \right) \right]^{\frac{1}{2}}$; $\chi = 0.5a + b$; $a = 8(n\pi)^2$; $b = 7(n\pi)^2$; $n = 1, 2, \dots$

На основі аналітичних розв'язків (9), (10) побудовано сімейство нейтральних кривих для задачі Релея з твердими границями і змішаними граничними умовами, тобто таких кривих, що у площині (Ra, k_r) розділяє

область стійких конвективних структур (області нижче кривої) та області нестійких конвективних структур (область вище кривої). Нейтральні криві для першої моди наведено на рис. 4. Порівняння отриманих аналітичних результатів (крива 1) з даними, які отримані іншими авторами числовими методами (крапки на кривій 1), показує їх гарну кількісну відповідність.

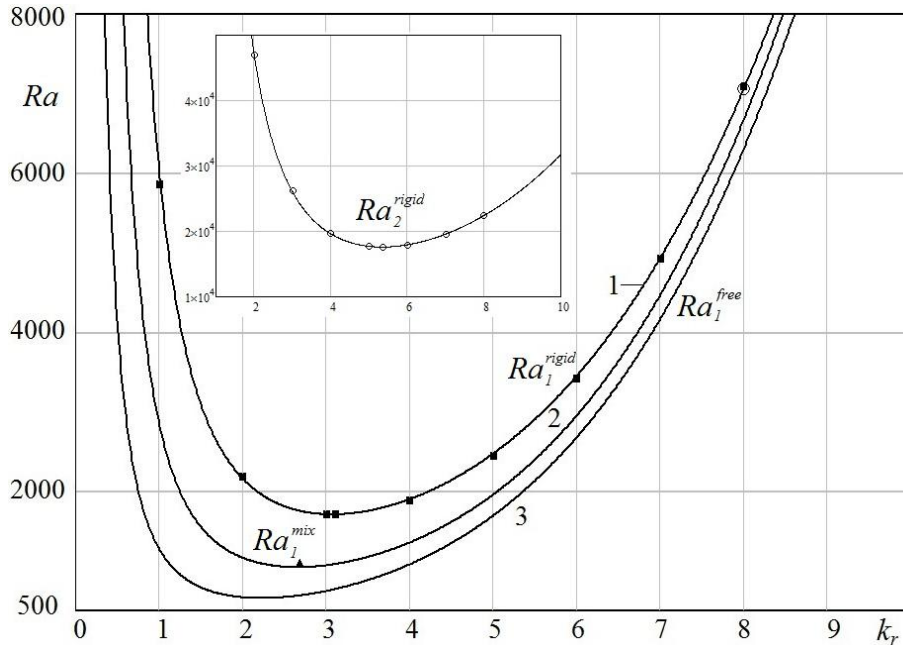


Рис. 4 Нейтральні криві для модового числа $n = 1$.

1 – дві границі тверді, 2 – тверда і вільна границі, 3 – обидві границі вільні

Аналіз отриманих аналітичних розв'язків задачі (1)–(6) дозволив отримати значення безрозмірного радіусу стійкої ЦКС. З (7) у випадку сталої конвективної структури ($\lambda = 0$), та з рівняння неперервності з урахуванням нестисливості рідини отримано частинні розв'язки для радіальної компоненти швидкості

$$v_r(z, t) = -\frac{dv(z)}{dt} \frac{1}{k_r} J_1(k_r r). \quad (11)$$

Оскільки радіальна компонента швидкості на осі ЦКС та бічній границі дорівнює нулю, то з (11) випливає, що вираз $k_r R_c$, де R_c – радіус стійкої ЦКС, може приймати значення лише нулів функції Бесселя першого роду першого порядку $J_1(x)$. Цей факт з урахуванням того, що спектр власних чисел є дискретним і по моді n , і по індексу радіального хвильового числа i , який відповідає номеру нуля функції Бесселя, дозволив отримати алгебраїчне рівняння відносно радіусу ЦКС при незмінному числі Релея. Його розв'язок, який має фізичний сенс, дає такі значення безрозмірних діаметрів ЦКС з твердими $(D_c)_{rigid}$ та змішаними $(D_c)_{mix}$ границями

$$\begin{aligned} (D_c)_{rigid} &= 2(R_c)_{rigid} = 2\sigma_{1,i}/(k_r)_{rigid} \approx 2 \cdot 3,832/3,116 \approx 2,46; \\ (D_c)_{mix} &= 2(R_c)_{mix} = 2\sigma_{1,i}/(k_r)_{mix} \approx 2 \cdot 3,832/2,682 \approx 2,86. \end{aligned} \quad (12)$$

Ці значення, що одержані аналітичним шляхом, добре збігаються з експериментально вимірними, що, разом з наведеним вище аналізом нейтральних кривих, доводить адекватність використаних математичних моделей і отриманих аналітичних розв'язків фізичним процесам, що розглядаються.

За допомогою отриманих аналітичних розв'язків задачі (1) – (6) також знайдено аналітичну залежність числа Нуссельта від числа Релея для режимів повзучого і ламінарного конвективних течій

$$Nu = 1 + \alpha \left(Ra Ra_{кр}^{-1} - 1 \right)^{\gamma+1} \left(1 + \delta \left(Ra Ra_{кр}^{-1} - 1 \right)^{\mu} \right)^{-1}. \quad (13)$$

Вона характеризується набором чотирьох констант α , δ , γ , μ , які є індивідуальними для кожного виду рідини і визначаються за даними експерименту.

Оскільки, наявність дотичних напружень на границях рідини (не важливо, якої природи) приводить задачу з математичної точки зору до тієї ж, що розглядається у випадку твердих границь, отримані аналітичні результати було застосовано для опису процесів тепломасопереносу в конвективних структурах з вільною верхньою границею при врахуванні її поверхневого натягу, що дає відмінні від нуля значення тангенціального тензора в'язких напружень.

У випадку стійкої конвективної структури ($\lambda = 0$) підстановка (7), (8) у стаціонарні аналоги рівнянь (1), (2) дала змогу отримати звичайні диференціальні рівняння для амплітуд збурень вертикальної швидкості і температури

$$\frac{d^4 v}{dz^4} - 2k_r^2 \frac{d^2 v}{dz^2} + k_r^4 v = Ra k_r^2 \mathcal{G}, \quad (14)$$

$$\frac{d^2 \mathcal{G}}{dz^2} - k_r^2 \mathcal{G} = -v. \quad (15)$$

Граничні умови для них у випадку твердої нижньої границі і наявності поверхневого натягу та тепловіддачі на верхній границі шару рідини мають вигляд

$$v = \Big|_{z=0} 0; \quad \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \mathcal{G} \Big|_{z=0} = 0; \quad (16)$$

$$v \Big|_{z=1} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \Big|_{z=1} = -k_r^2 \cdot Mg \cdot \mathcal{G} \Big|_{z=1}; \quad \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} \Big|_{z=1} = -Bi \cdot \mathcal{G} \Big|_{z=1}. \quad (17)$$

де $Mg = \gamma \theta h / \rho \nu \chi$ – число Марангоні; $\gamma = -d\sigma/dT$ – температурний коефіцієнт поверхневого натягу; $Bi = kh/\chi_m$ – число Біо.

Виходячи з (14) – (17), отримано співвідношення між числами Релея і Марангоні

$$Ra(k_r) = \left(2k_r^2 - 2X_+^2 + 2\pi^2 \right) Mg(k_r), \quad (18)$$

а також знайдено залежність числа Марангоні від хвильового числа

$$Mg(k_r) = -\frac{2\pi X_+ th(X_+/2)(Bi \cdot sh(k_r) + k_r ch(k_r))}{k_r^2 I(X_+, k_r)}. \quad (19)$$

З (18) і (19) впливає співвідношення між числами Релея і Марангоні для крайової задачі з твердими граничними умовами

$$Ra^{rigid}(k_r) = 2\left((0.7 \cdot k_r)^2 - X_+^2\left((0.7 \cdot k_r)^2\right) + \pi^2\right) M^{rigid}(k_r). \quad (20)$$

Проведений аналіз отриманих аналітичних виразів показав, що числа Релея, які знаходяться на нейтральній кривій, не залежать від чисел Марангоні, а пов'язані співвідношенням (20).

В четвертому розділі наведено опис щодо вдосконалення за рахунок вільноконвективного тепломасопереносу процесу гомогенізації легуючої домішки при вакуумно-дуговому виготовленні реакторної сталі.

На рис. 5 наведено принципову схему експериментальної установки для вакуумно-дугового переплаву сталі.

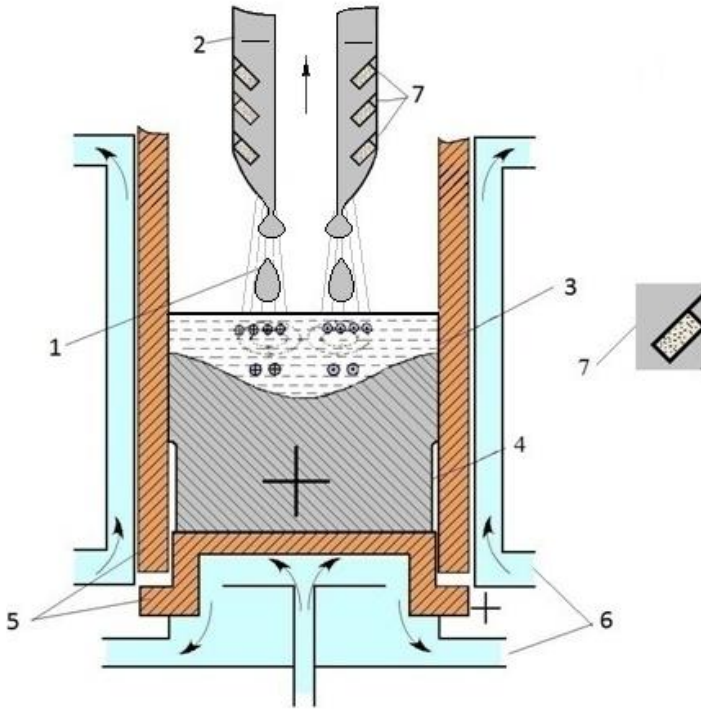


Рис. 5 Схема експериментальної установки

Між кристалізатором 5, який є анодом та рухомим циліндричним катодом 2, який виготовлено зі сталі запалюється та підтримується електрична дуга. За рахунок цього катод плавиться і краплі розплаву сталі разом з частинками легуючої домішки, що містяться у отворах 7 катоду, потрапляють в кристалізатор. В результаті цього там утворюється горизонтальний шар 3 розплаву металу, який в результаті охолодження проточною водою 6 кристалізується у злиток 4. При цьому катод, що плавиться, повільно рухається у вертикальному напрямку, а злиток росте знизу до гори. Внаслідок цього в процесі переплаву шар розплаву 3 має незмінну товщину. Плавлення відбувається в вакуумі близько 10^{-3} Па, що забезпечує незначне випаровування розплаву, через що відбувається і охолодження його верхньої границі. В результаті в розплаві утворюється конвективна структура, яка повністю займає його об'єм та відповідає ЦКС, що розглядалися вще.

Для запобігання скупчення частинок легуючої домішки на стінках кристалізатора при її малому процентному вмісті запропоновано новий

методологічний підхід до конструювання катоду, який в осьовому перерізі має утворювати структуру типу "hollow fish - bone" (HFB) (рис. 6).

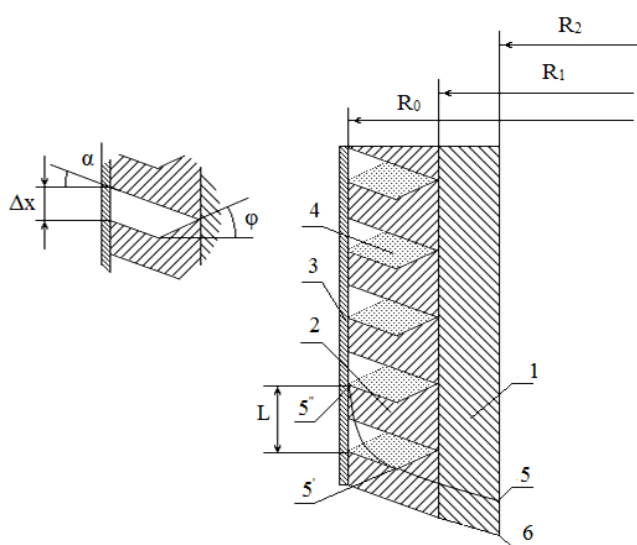


Рис. 6 Схема катоду для вакуумно-дугової виплавки ДЗО сталі: 1 – трубчастий катод (зовнішній радіус R_1 , внутрішній – R_2); 2 – шайба спеціальної форми (зовнішній радіус R_0 , внутрішній – R_1); 3 – тонкостінна циліндрична трубка; 4 – мікро- нанодисперсні частинки легуючої домішки; 5 – лінія плавлення катоду; 5', 5'' – закінчення та початок висипання частинок легуючої домішки з канавки; 6 – нижній виступ катоду, на якому утворюються краплі металу

Згідно з наведеною на рис. 6 схемою, на поверхні трубчастого сталевого катоду 1 утворюються похилі кругові канавки шириною Δx , утворююча дна яких становить з радіусом катоду кут, рівний куту природного укосу діоксиду цирконію φ (рис. 6). Кут нахилу осі кругових канавок α по відношенню до радіусу катоду вибирався таким, щоб був значно менше кута природного укосу порошку діоксиду цирконію φ , і забезпечував відсутність висипання порошку при вібрації катоду під час переплаву. Також для запобігання висипання порошку діоксиду цирконію з канавок катоду при його переміщеннях, пов'язаних з установкою в вакуумну камеру, вся система HFB запресовується в тонкостінну циліндричну трубку 3, виготовлену з такої ж марки сталі.

При малій кількості легуючої домішки на дні конвективної структури відсутній прошарок чистої сталі і відбувається тертя розплаву металу о твердий злиток, тобто конвективна структура має нижню тверду границю і верхню вільну.

Виходячи з геометрії порожнистого катоду розраховано масу сталі M_{St} , що переплавляється, та масу порошку легуючої домішки $M_{л.д.}$, що відповідають періоду нарізки L кругових канавок.

Маса порошку легуючої домішки $M_{л.д.}$ в похилій круговій канавці

$$M_{л.д.} = \pi R_0^2 \Delta x \rho_{л.д.} (1 - Z_1^2 - 2Z_1 X / \operatorname{tg}(\varphi)), \quad (21)$$

де $Z_1 = R_1/R_0$; $X = \Delta x/R_0$; $\varphi \gg \alpha$; $X \ll 1$.

Маса сталевий заготовки на періоді нарізки L дорівнює $M_{St} = \pi R_0^2 L \rho_{St}$, де ρ_{St} – щільність нержавіючої сталі.

Для реалізації умов, що відповідають твердій границі на межі розплав – злиток необхідно виконання співвідношення

$$M_{л.д.}/M_{St} = \gamma X (1 - Z_1^2 - 2X \cdot Z_1 / \operatorname{tg}(\varphi)) (\delta^{-1} X Z_1^2 - Z_2^2)^{-1} \leq 1.25 \cdot 10^{-3}, \quad (22)$$

де $\gamma = \rho_{л.д.} / \delta \rho_{St}$, $\delta = L/R_0$, $Z_2 = R_2/R_0$.

Можна показати, що умова рівномірного і безперервного надходження порошку легуючої домішки в розплав, виходячи з форми лінії танення катода $z = \beta_{St} r^d$, (z і r – вертикальна і горизонтальна координати точок катода відповідно), описується співвідношенням

$$H/NL = \delta/\beta (1 - Z_1^3 - 3Z_1^2 X / \operatorname{tg}(\varphi))^{-1} = 1, \quad (23)$$

де $\beta_{St} = \beta/R_0^{d-1}$ – постійна для даного металу величин, β і d – безрозмірні константи, які визначаються експериментально.

Моделльні розрахунки просторового розподілу конвективної швидкості масопереносу рідкого металу в циліндричній конвективній структурі з неплоским профілем дна і змішаними граничними умовами показують, що лінії Стокса є концентрично розташованими, гладкими, замкненими і мають вигляд одного вихору. Частинки легуючої домішки в рідкому розплаві металу будуть рухатись повторюючи хід ліній Стокса. Їх положення буде визначатися результуючої діючих сил: сили Архімеда, сили тяжіння і сили опору Стокса.

У вакуумно-дуговій печі матеріал катода у вигляді крапель металу, що містять частинки легуючої домішки, накопичується на круговій утворюючій нижньої частині порожнини катода і спадають на поверхню циліндричної конвективної структури за такою ж круговою утворюючою, що і на катоді. Краплі металу проникають у розплав на відстані від вісі конвективної структури, яка відповідає радіусу порожнини катода. Тут вони силами Архімеда і Стокса, долаючи силу тяжіння, захоплюються вгору. Поблизу верхньої границі ЦКС мала доля наночасток радіальним потоком виноситься до стінки кристалізатора, і осідає на ньому. Інша доля частинок силами Стокса і тяжіння, що перевищують силу Архімеда, направляються до дна конвективної структури. Ці частинки потрапляють в замкнений конвективний потік, і здатні до конвективного перемішування всередині ЦКС, нижня частина якої поступово кристалізується, що рівнозначно їх рівномірному розподілу за всім об'ємом злитка ДЗО сталі.

Умова гомогенізації накладає наступне обмеження на розміри частинок

$$r_p \leq 10^{-2} \sqrt{v_c \frac{9v \Delta l}{2g R_c} \frac{\rho_{St}}{\rho_{St} - \rho_{л.д.}}}, \quad (24)$$

де v_c – максимальна швидкість переміщення рідкого металу на верхній горизонтальній поверхні ЦКС; Δl – середня відстань між частинками легуючої домішки; R_c – радіус ЦКС; ρ_{St} , $\rho_{л.д.}$ – щільність рідкого металу і легуючої домішки відповідно. На рис. 7 показано, що всі частинки легуючої домішки разом з рідким матеріалом катода у вигляді крапель, одна з яких умовно відзначена краплеподібною фігурою у верхньому лівому кутку ЦКС,

будуть потрапляти в об'єм ЦКС. Потім частинки, що потрапили в рідкий метал конвективної структури, будуть рухатися уздовж ліній струму всередину конвективної структури (лінії II) або до стінки кристалізатора (лінії I).

В умовах експериментальних досліджень, які було проведено зі сталлю 08X18H10T та легуючою домішкою – діоксидом цирконія, нерівність (24) показує, що частинки легуючої домішки з розмірами $r_p < 90$ нм рівномірно розподіляються за об'ємом злитка ДЗО сталі, а частинки з розміром більше 160 нм виносяться конвективним потоком на стінку кристалізатора.

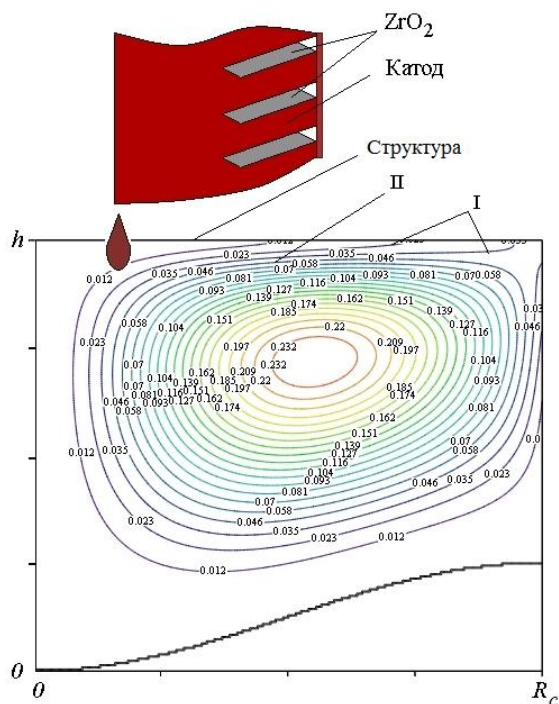


Рис. 7 Схематичне зображення руху частинок ZrO_2 з потоком рідкого металу в конвективній структурі. Лінії з цифровими значеннями відповідають лініям струму

- Виходячи з вище викладеного, можна сформулювати наступні висновки:
- краплі металу порожнистого катода будуть проникати в ЦКС по круговій лінії, яка відповідає внутрішньому колу порожнини катода;
 - проникнення крапель матеріалу катода на глибину, відповідну половині висоти конвективної структури, забезпечує рівномірний розподіл частинок легуючої домішки в об'ємі конвективної структури;
 - для частинок легуючої домішки – діоксиду цирконію з розмірами менше 90 нм має спостерігатися рівномірний розподіл в об'ємі зразка.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі – розробці науково-практичних основ використання упорядкованих конвективних структур в технологічному процесі вакуумно-дугового переплаву сталі для покращення гомогенізації легуючої домішки у разі її малої процентної кількості. В ході її виконання отримані такі наукові і практичні результати.

1. Вперше експериментально показано, що додавання у в'язку нестисливу рідину малої кількості дисперсної фази (0,02 мас. %) може утворювати на границі конвективної структури, що стикається з твердою поверхнею, як тверді, так і вільні граничні умови. Зокрема встановлено, що якщо розмір часток дисперсної фази менше або становить порядок товщини прикордонного шару дисперсного середовища, то рідина є однофазною, і на дні ємності формуються тверді граничні умови. Це важливо для визначення виду граничних умов при вирішенні задачі гомогенізації легуючої домішки при виготовленні дисперсно-зміцнених оксидами сталей.

2. Вперше в циліндричній геометрії отримано аналітичний розв'язок стаціонарної задачі Релея з твердими граничними умовами. На підставі цього розв'язку для різних модових чисел побудовано сімейство нейтральних кривих, які з високим ступенем точності відповідають результатам числових розрахунків інших авторів, що дозволило визначити параметри установки, при яких спостерігається стійка конвективна структура в розплаві металу.

3. Для в'язких нестисливих рідин в режимах повзучої і ламінарної конвективних течій отримана нова аналітична залежність числа Нуссельта від числа Релея, яка характеризується індивідуальним набором чотирьох констант для кожного виду рідини.

4. Вперше показано, що наявність або відсутність тертя на границі стійкої конвективної структури в шарі в'язкої нестисливої рідини впливає на її розміри: експериментальні дослідження показують, що в разі твердих граничних умов безрозмірний діаметр конвективної структури становить 2,4 – 2,5; в разі змішаних граничних умов становить 2,6 – 2,7. При цьому значення безрозмірного діаметра конвективної структури, отримане аналітичним шляхом у разі твердих граничних умов становить 2,46. При виплавці дисперсно-зміцненої оксидами сталі реалізувався діаметр, відповідний твердим граничним умовам.

5. Вперше показано, що наявність поверхневого натягу на верхній границі шару рідини при твердих граничних умовах на його нижній границі приводить до задачі Релея з твердими граничними умовами. Вперше на основі отриманих аналітичних розв'язків задачі Релея з твердими граничними умовами, досліджено процес тепломасопереносу в циліндричній конвективній структурі з вільною верхньою границею з урахуванням поверхневого натягу. Отримана нова залежність числа Марангоні від хвильового числа і числа Біо. Отримані теоретичні дані щодо розміру конвективної структури відповідають експериментальним вимірам.

6. На основі отриманих аналітичних розв'язків для конвективного тепломасопереносу в циліндричній структурі зі змішаними граничними умовами, запропонована нова форма катода з віською циліндричною порожниною. Вперше показано, що для конвективної гомогенізації частинок легуючої домішки в процесі вакуумно-дугового переплаву сталі 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 ± 5 нм. Висновки щодо розмірів частинок

оксидної фази підтверджені експериментами по виплавці дисперсно-зміцненої оксидами сталі.

7. За допомогою запропонованого методологічного підходу розроблено нову конструкцію катоду вакуумно-дугової печі, на яку отримано патент України на винахід (№117996) «Катодний витрачуваний електрод для отримання вакуумно-дуговим переплавом дисперсно-зміцненої оксидами сталі». Результати дисертаційної роботи впроваджені в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України при вдосконаленні процесу виготовлення дисперсно-зміцнених оксидами сталей з малим відсотковим вмістом легуючої домішки та використовуються у навчальному процесі в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна на фізико-енергетичному факультеті.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Экспериментальные исследования элементарной конвективной ячейки с твердыми и смешанными граничными условиями в горизонтальном слое вязкой несжимаемой жидкости. Андреева О. Л., Борц Б. В., Костиков О. А., Ткаченко В. И. // Интегровані технології та енергозбереження. 2016. № 4, С. 30 – 35.

2. Investigation of the Oxide Phase Convective Homogenization While Vacuum-Arc with Hollow Cathode Remelting of Steel / Andreeva O., Borts B., Kostikov A., Tkachenko V. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 5/5 (83), P. 25 – 32.

3. Паточкина О. Л. (Андреева О. Л.), Казаринов Ю. Г., Ткаченко В. И. Физическая модель зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея // Журнал технической физики. 2016. Т. 66, № 11, С. 23 – 29.

4. Андреева О. Л., Костиков А. О., Ткаченко В. И. Теплоперенос в подогреваемой снизу цилиндрической конвективной ячейке со свободной верхней границей при учете поверхностного натяжения // Интегровані технології та енергозбереження. 2017. № 2, С. 3 – 14.

5. Андреева О. Л., Костиков А. О., Ткаченко В. И. Аналитическое решение и нейтральные кривые стационарной линейной задачи Рэлея для цилиндрических конвективных ячеек с твердыми и смешанными граничными условиями // Проблемы машиностроения. 2017. Т. 20, №1, С.17 – 28.

6. Андреева О. Л., Костиков А. О., Ткаченко В. И. Конвективный теплообмен вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической ячейке с конически углубленным дном и твердыми граничными условиями // Проблемы машиностроения. 2017. Т. 20, № 2, С. 22 – 28.

7. Теоретическое исследование элементарной конвективной ячейки с твердыми и смешанными граничными условиями в горизонтальном слое вязкой несжимаемой жидкости / Андреева О. Л., Борц Б. В., Костиков А. О., Ткаченко В. И. // Электронное моделирование. 2017. Т. 39, № 2, С. 35 – 46.

8. Пат. 117996 Україна, МПК51 С22В 9/20. Катодний витрачуваний електрод для вакуумно-дугового переплаву / О. Л. Андреева, Б. В. Борц,

О. Ф. Ванжа, В. І.Ткаченко ; власник Нац. наук. центр «Харківський фізико-технічний інститут». – № а 2017 09627 ; заявл. 02.10.2017 ; опублік. 25.10.2018, Бюл. № 20. – 5 с.

9. Паточкина О. Л. (Андреева О. Л.), Ткаченко В. И., Костиков А. О. Элементарная конвективная ячейка и концентрические конвективные валы в слое вязкой, несжимаемой жидкости с твердыми границами // Физико-технические проблемы энергетики и пути их решения: тезисы докладов Международной научно-технической конф., 22 июня 2014 г., Харьков, Украина. С. 35.

10. Паточкина О. Л. (Андреева О. Л.) Точное решение задачи Рэлея в цилиндрической геометрии с твердыми граничными условиями и построение на его основе нейтральной кривой // Конференция молодых ученых ИПМаш НАН Украины: тезисы докладов Международной научно-технической конф., 17 - 20 ноября 2014 г., Харьков, Украина. С. 42.

11. Андреева О. Л., Иванюк М. І., Кулик О. П. Тепломасоперенос у конвективних циліндричних комірках з параболічним профілем дна і твердими граничними умовам // Матеріали XVI всеукраїнської науково-технічної конференції, 5-7 жовтня 2016, г. Одеса, Україна. С. 28 – 29.

12. Паточкина О. Л. (Андреева О. Л.) Тепловая конвекция в элементарной цилиндрической ячейке с неплоским профилем дна и твердыми граничными условиями // Конференция молодых ученых ИПМаш НАН Украины: тезисы докладов Международной научно-технической конф. 16 - 19 ноября 2015 г., Харьков. С. 20.

13. Patochkina O. L., (Andreeva O. L.), Tkachenko V .I. Heat Convection of Viscous Incompressible Liquid in a Cylindric Elementary Convection Cell with a Conical Cavity Bottom and Solid Boundary Conditions // YSF-2015: Intern. Young Sci. Forum on Appl. Phys., 29 September - 2 October 2015. Dnipropetrovsk. Ukraine / P. PECCS 10.

14. Андреева О. Л., Ткаченко В. І. Феноменологія процесів в циліндричній конвективній комірці з вільною верхньою межею, що деформується, з урахуванням поверхневого натягу // ЕВРИКА: матеріали Міжнар. конф. студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 16 - 18 травня 2017, Львів. С. F1.

15. Андреева О. Л. Моделювання масопереносу розплаву сталі в циліндричній комірці з неплоским профілем дна для гомогенізації нанопорошку оксиду при вакуумно-дуговому виготовленні ДЗО сталі // Проблеми інформатизації: тези доповідей VI міжнародної науково-технічної конференції. Черкаси – Баку – Бельсько – Бяла – Харків, 14–16 листопада 2018 р. С. 141.

16. Паточкина О. Л. (Андреева О. Л.), Борц Б. В., Ткаченко В. И. Примітні явища природи: осередки Бенара з твердими межами: методичні вказівки до курсу "Ресурсозберігаючі та екологічно чисті технології". Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. 28 с.

АНОТАЦІЯ

Андрєєва О. Л. Використання конвективних структур в шарах в'язкої рідини з твердими границями для гомогенізації легуючої домішки в розплаві сталі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, 2019.

В дисертаційній роботі запропоновано використання конвективної структури з твердими границями, яка виникає у розплаві металу при вакуумно-дуговому переплаві сталі, і має висхідну течію у центрі, і спадну - поблизу стінки кристалізатора, для гомогенізації оксидної фази конструкційних сталей. Визначено закономірності виникнення конвективної течії в горизонтальних шарах в'язкої, нестисливої рідини з твердими границями та змішаними граничними умовами, що підігріваються знизу. Показано, що в такому шарі кількість розрізаних циліндричних конвективних структур із збільшенням температури дна ємності зростає від однієї - двох до великої їх кількості, які формують комірочки Бенара. Отримано аналітичний розв'язок задачі Релея з твердими границями, побудовані нейтральні криві, сформульовано фізичну модель залежності числа Нуссельта від числа Релея, враховано вплив поверхневого натягу на параметри конвективної структури. Визначено розмір діаметра конвективних структур (в одиницях глибини шару): експеримент 2,5 – 2,6, теорія – 2,46. Запропоновано використання "hollow fish - bone" катоду для підвищення гомогенізації порошку діоксиду цирконію у злитку. Показано, що для катоду типу "hollow fish-bone" гомогенізація частинок діоксиду цирконію можлива при їх досить малому розмірі (менше 90 ± 5 нм).

Ключові слова: конструкційна сталь, оксид, вакуумно-дуговий переплав, гомогенізація, катод, рідина, рівняння Нав'є–Стокса, тверді границі, конвективні структури, поверхневий натяг.

ABSTRACT

Andreeva O. L. The use of ordered convection structures in viscous fluid layers with solid boundaries for the homogenization of the oxide phase of structural steels. - As a manuscript.

Thesis for submission of a Candidate's degree in technical sciences under specialty 05.14.06 – «Technical Thermal Physics and Industrial Heat-Power Engineering». – A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The use of a convective cell with solid boundaries, which arises in the metal melt in the vacuum-arc remelting of steel, has an upward flow in the center, and a downward near the wall of the crystallizer, is proposed for the homogenization of the oxide phase of the structural steels. The regularities of occurrence of convective flow in horizontal layers of a viscous, incompressible liquid with solid and mixed boundary conditions, which are heated from below, are determined. It is

shown that in this layer the number of disjointed cylindrical convective cells increases with the temperature of the bottom of the container from one - two cells to a large number of them, which form cells of Benard. An analytical solution of the Rayleigh problem with solid boundary conditions is obtained, neutral curves are constructed, the physical model of the dependence of the number of Nusselt on the Rayleigh number is formulated, the influence of the surface tension on the parameters of the convective cell is taken into account. The diameter of the convection cells (in units of depth of the layer) is determined: the experiment is 2,5 – 2,6, the theory – 2,46. The use of the "hollow fish-bone" cathode was proposed to increase homogenization of zirconium dioxide powder in the ingot. It was shown that for a cathode of the type "hollow fish-bone", homogenization of particles of zirconium dioxide is possible at their very small size (less than 90 ± 5 nm).

Key words: structural steel, oxide, vacuum-arc remelt, homogenization, cathode, fluid, Navier-Stokes equations, solid boundary conditions, convective structures, surface tension.