

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

_____ Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим(магістерським) рівнем
вищої освіти

на тему

**«Дослідження процесу теплопередачі між ливарним
алюмінієвим сплавом системи Al-Si і кокілем»**
«Study of the process of heat transfer between the cast aluminium
alloy of the Al-Si system and the mold»

Виконав здобувач вищої освіти:

II курсу, групи ПМ-23Мз-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 Прикладна механіка

_____ Міщенко А.І.

Керівник роботи:

к.т.н. доцент _____ Олександр КУЗИК

Рецензент: _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти _____ магістр _____

Галузь знань _____ 13 Механічна інженерія _____

Спеціальність _____ 131 "Прикладна механіка" _____

Освітньо-професійна програма «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри _____

к.т.н. доцент, Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 2024 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ
(МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ
ОСВІТИ**

Міщенко Аліна Іванівна

1. Тема роботи: "Дослідження процесу теплопередачі між ливарним алюмінієвим сплавом системи Al-Si і кокілем"

2. Керівник роботи Кузик Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент

Затверджені наказом вищого навчального закладу від "07" серпня 2024 року № 31-13

3. Строк подання роботи до захисту "05" грудня 2024 року _____

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є дослідження впливу інтервалу кристалізації ливарних алюмінієвих сплавів Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 при заливанні в кокіль на вид температурної залежності коефіцієнта теплопередачі.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати способи визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою та формою при литті ливарних алюмінієвих сплавів.

2. Запропонувати лабораторну установку для дослідження процесу теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 і кокілем.

3. Розробити методику визначення значення коефіцієнта теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 і кокілем.

4. Вибрати основні методики дослідження хімічного складу ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si.

5. Провести аналіз температурних залежностей коефіцієнтів теплопередачі між алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 та формою зі сталі.

5. Провести експериментальні дослідження впливу інтервалу кристалізації ливарних алюмінієвих сплавів Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 при заливанні в кокіль на вид температурної залежності коефіцієнта теплопередачі.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 2	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 3	доц., Олександр КУЗИК		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1	02.10	
2	Розділ 2	23.10	
3	Розділ 3	22.11	
4	Графічний матеріал	05.12	

Дата видачі завдання

«4» 09 2024 року

Керівник роботи

Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

« » 2024 року

 Аліна МІЩЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу виконала здобувачка вищої освіти Міщенко Аліна Іванівна студентка II курсу, групи ПМ-22Мз-1, ОПП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка на тему "Дослідження процесу теплопередачі між ливарним алюмінієвим сплавом системи Al-Si і кокілем", яка складається з пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу. Пояснювальна записка містить 59 сторінок тексту, формату А4, 13 рисунка, 4 таблиць. Ілюстративний матеріал містить 1 слайдів.

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена дослідження процесу теплопередачі між ливарним алюмінієвим сплавом системи Al-Si і кокілем.

Серед багатьох взаємопов'язаних процесів під час технологічного процесу формування виливків одне з головних місць займають теплові процеси. Температура є одним з найважливішим термодинамічним параметром, що визначає стан будь-якої системи.

Величина коефіцієнта теплопередачі залежить від багатьох параметрів, таких як температура поверхні виливка, теплофізичних властивостей матеріалів виливка і форми, тиску, величини зазору, що з'являється при усадці виливка і тепловим розширенням форми, шорсткістю поверхні форми та атмосферу в зазорі виливок-форма, товщину і склад фарб і покриттів.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі були вибрані широко відомі сплави на основі системи Al-Si з різним інтервалом кристалізації, що використовуються в ливарному виробництві, а також сплав МЛ5. Матеріал для виготовлення форми був обраний сталь. В сучасних умовах точні знання теплофізичних властивостей матеріалів форм та ливарних сплавів, а також значення коефіцієнта теплопередачі на межі поділу метал-форма дають широкі можливості для моделювання ливарних процесів.

Для визначення значення коефіцієнта теплопередачі були розміщені термопар безпосередньо на границі контакту металу з формою (T_1 , T_2) – мінімальне значення функції помилок для них було отримано за значення

коефіцієнта теплопередачі h_L рівному $900 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ і h_S дорівнює $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Виявлено, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі $2600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ при температурі 658°C досягається при температурі вище, ніж температура ліквідусу сплаву для всіх сплавів, крім сплаву Al-12Si. Для даного сплаву максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі нижче солідусу.

При температурах соліду 576°C , 552°C , 576°C для трьох сплавів - Al-3Si, Al-7Si і Al-12Si - значення коефіцієнта теплопередачі склали відповідно $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, $550 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ і $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, зі збільшенням частки твердої фази в сплаві відбувається значне зниження коефіцієнта теплопередачі. Максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається поблизу температури ліквідусу сплаву.

Графік зміни коефіцієнта теплопередачі між виливком із сплаву МЛ5 і кокілем зі сталі 20 показує максимальне значення коефіцієнта теплопередачі при температурі, близької до температури ліквідусу сплаву. Найбільш значну зміну коефіцієнта теплопередачі можна спостерігати в інтервалі кристалізації сплаву. А після повного затвердіння виливка, коефіцієнт теплопередачі змінюється менш помітно.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розплав, ливарний алюмінієвий сплав, структура, властивості, теплові процеси, виливка, кристалізація, ліквідус, солідус.

ABSTRACT

The qualifying master's thesis was completed by a high-level baker Alina Ivanovna Mishchenko, a second-year student, group PM-22Mz-1, OPP "Applied Mechanics" special 131 Applied Mechanics on the topic "Study of the process of heat transfer between the cast aluminium alloy of the Al-Si system and the mold ", which are stored with an explanatory note and illustrative material. Explanatory note 59 pages of text, A4 format, 13 figures, 4 tables. Illustrative material contains 12 slides.

The qualification of the master's thesis is devoted to the heat transfer process using aluminum alloys Al-Si and cocaine.

Among the many complex processes during the technological process, single processes associated with obtaining thermal processes are formed. Temperature is one of the most important thermodynamic parameters, which is important for each systems.

The value of the heat transfer coefficient is saved from large parameters, such as the surface temperature of the surface, the thermophysical properties of the materials of the fork and forms, sizes, sizes, which are used in the shrinkage of the fork and thermal expansion of forms, surface rigidity. Forms and atmosphere in gap fork-forms, in the warehouse and warehouse of paints and coatings.

To determine the heat transfer coefficient, widely known alloys on the main Al-Si systems with different crystallization intervals, which are used in various developments, as well as the ML5 alloy, were selected. Material for the manufacture of stainless steel forms. In modern minds, accurate knowledge of the thermophysical properties of materials in the form of various alloys, as well as a significant heat transfer coefficient in interphase metaforms provide ample opportunities for modeling technological processes. To determine the value of the heat transfer coefficient, thermocouples were located directly at the boundaries of the metal contact with the mold (T_1 , T_2) - the minimum value of the heat transfer function, so that they could be selected for the value of the heat transfer coefficient h_L equal to $900 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$ and h_S up to $600 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$. It was found that the maximum value of the heat transfer coefficient of $2600 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ at a temperature of 658°C is achieved at a body temperature below the liquid alloy temperature for all alloys, cream of the Al-12Si alloy. For such an alloy, the maximum height means that the heat transfer coefficient is achieved at a temperature below the solidus. At salt temperatures of 576°C , 552°C , 576°C for three alloys - Al-3Si, Al-7Si and Al-12Si - the significant heat transfer coefficient will be uniformly $1000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $550 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ and $1500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, with increased parts of solid phases in alloys, production means a reduced heat transfer coefficient. The maximum value of the heat transfer coefficient is achieved near the temperature of the liquid and alloy.

The graph of the heat transfer coefficient measurement with the participation of

forks made of ML5 alloy and a collection of 20 minutes has the maximum value of the heat transfer coefficient at a temperature from temperature to the temperature of the liquid alloy. The heat transfer coefficient, which can be maintained in the intervals between crystallization of the alloy, has a greater value. And after repeated confirmation, the heat transfer coefficient changes less time.

KEYWORDS: melt, livar aluminum alloy, structure, power, thermal processes, pouring, crystallization, liquidus, solidus

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МІЖ ВИЛИВКОЮ ТА ЛИВАРНОЮ ФОРМОЮ	11
1.1 Коефіцієнт теплопередачі	11
1.2 Методики визначення коефіцієнту теплопередачі	13
1.3 Результати визначення коефіцієнту теплопередачі.	15
1.4 Сплави на основі системи Al-Si	19
1.5 Сучасні системи комп'ютерного моделювання ливарних процесів	20
Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЛИВАРНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ	29
2.1 Характеристика та приготування сплавів системи Al-Si	29
2.2 Характеристика та плавка ливарного магнієвого сплаву МЛ5	30
2.3 Установка для дослідження процесу теплопередачі між ливарним алюмінієвим сплавом та кокілем	31
2.4 Методика визначення хімічного складу ливарного алюмінієвого сплаву	34
Висновки до другому розділу.....	35
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МІЖ ЛИВАРНИМ АЛЮМІНІЄВИМ СПЛАВОМ СИСТЕМИ AL-Si І КОКІЛЕМ	36
3.1 Визначення коефіцієнта теплопередачі при заливанні ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si і кокілем	36
3.2 Результати визначення коефіцієнта теплопередачі при заливанні сплавів Al-Si у форму зі сталі 20	37
3.3 Результати визначення коефіцієнта теплопередачі при заливанні сплаву МЛ5 у форму із сталі 20	47
3.4 Аналіз температурних залежностей при заливанні ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si в кокіль.	50
ЗАГАЛЬНІ	52

ВСТУП

Серед багатьох взаємопов'язаних процесів під час технологічного процесу формування виливків одне з головних місць займають теплові процеси. Температура є одним з найважливішим термодинамічним параметром, що визначає стан будь-якої системи.

При формуванні виливка має місце складний теплообмін, що реалізується всіма відомими механізмами теплопередачі: теплопровідністю, конвекцією та тепловим випромінюванням. При цьому закономірності зміни температури сплаву та матеріалу форми багато в чому визначають якість литих заготовок. Умови теплообміну між виливкою та формою зумовлюють закономірності основного ливарного процесу – затвердіння виливків.

Надійність виливків визначається, в основному, кристалічною будовою, величиною макро- та мікронеоднорідності, усадковою пористістю, зародженням гарячих тріщин та іншими дефектами, тобто перебуває у прямій залежності від фізико-хімічних та теплофізичних процесів, що відбуваються при кристалізації та затвердінні сплавів. Тому дослідження процесів теплопередачі між ливарним алюмінієвим сплавом та формою є актуальною.

Метою роботи є дослідження впливу інтервалу кристалізації ливарних алюмінієвих сплавів Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 при заливанні в кокіль на вид температурної залежності коефіцієнта теплопередачі.

Для реалізації поставленої мети в магістерській роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати способи визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою та формою при литті ливарних алюмінієвих сплавів.

2. Запропонувати лабораторну установку для дослідження процесу теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем.

3. Розробити методику визначення значення коефіцієнта теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем.

4. Вибрати основні методики дослідження хімічного складу ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si.

5. Провести аналіз температурних залежностей коефіцієнтів теплопередачі між алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 та формою зі сталі.

6. Провести експериментальні дослідження впливу інтервалу кристалізації ливарних алюмінієвих сплавів Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 при заливанні в кокіль на вид температурної залежності коефіцієнта теплопередачі.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МІЖ ВИЛИВКОЮ ТА ЛИВАРНОЮ ФОРМОЮ

1.1 Коефіцієнт теплопередачі

Коефіцієнт теплопередачі – це один із найважливіших параметрів, який визначає ефективність передачі тепла між виливком і формою при литті сплавів. Даний коефіцієнт є ключовим фактором для оптимізації процесу лиття, оскільки він напряму впливає на якість виливка. Коефіцієнт теплопередачі показує, яке число теплоти переходить в одиницю часу від більш нагрітого до меншого нагрітого тіла через 1 м² поверхні при різності температури між тілами в 1 градус.

Однак, точне вирахування коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою є складною задачею, і як правило його визначають експериментальним шляхом, але в сучасних умовах поширена тенденція на процес комп'ютерного моделювання, що дозволяє значно поліпшити прогнозування дефектів у виливках.

Величина коефіцієнта теплопередачі залежить від багатьох параметрів, таких як температура поверхні виливка, теплофізичних властивостей матеріалів виливка і форми, тиску (наприклад, при литті прокатці і під тиском), величини зазору, що з'являється при усадці виливка і тепловим розширенням форми, шорсткістю поверхні форми та атмосферу в зазорі виливок-форма. Значення має також товщину і склад фарб і покриттів [1-7].

Коефіцієнт теплопередачі, як правило, не є постійною величиною і змінюється в процесі затвердіння виливка [8, 9]. При кристалізації виливка утворюється тверда кірка, яка як тверде тіло піддається лінійній усадці. Таким чином в процесі охолодження відбувається формування повітряного зазору між виливкою і формою. Значення коефіцієнта теплопередачі знижується, в міру

зниження температури поверхні виливка і збільшення величини повітряного зазору.

Коли розплавлений метал вступає в контакт з охолоджуваною поверхнею форми, утворюється тонкий шар затверділого металу [10]. Але на цьому етапі теплопередача відбувається за рахунок теплопровідності через виступи на шорстких поверхнях виливка і форми, що знаходяться в контакті, а також за рахунок теплопровідності через повітря або інші гази, що знаходяться в пустотах між цими контактними площинами (рисунок 1.1).

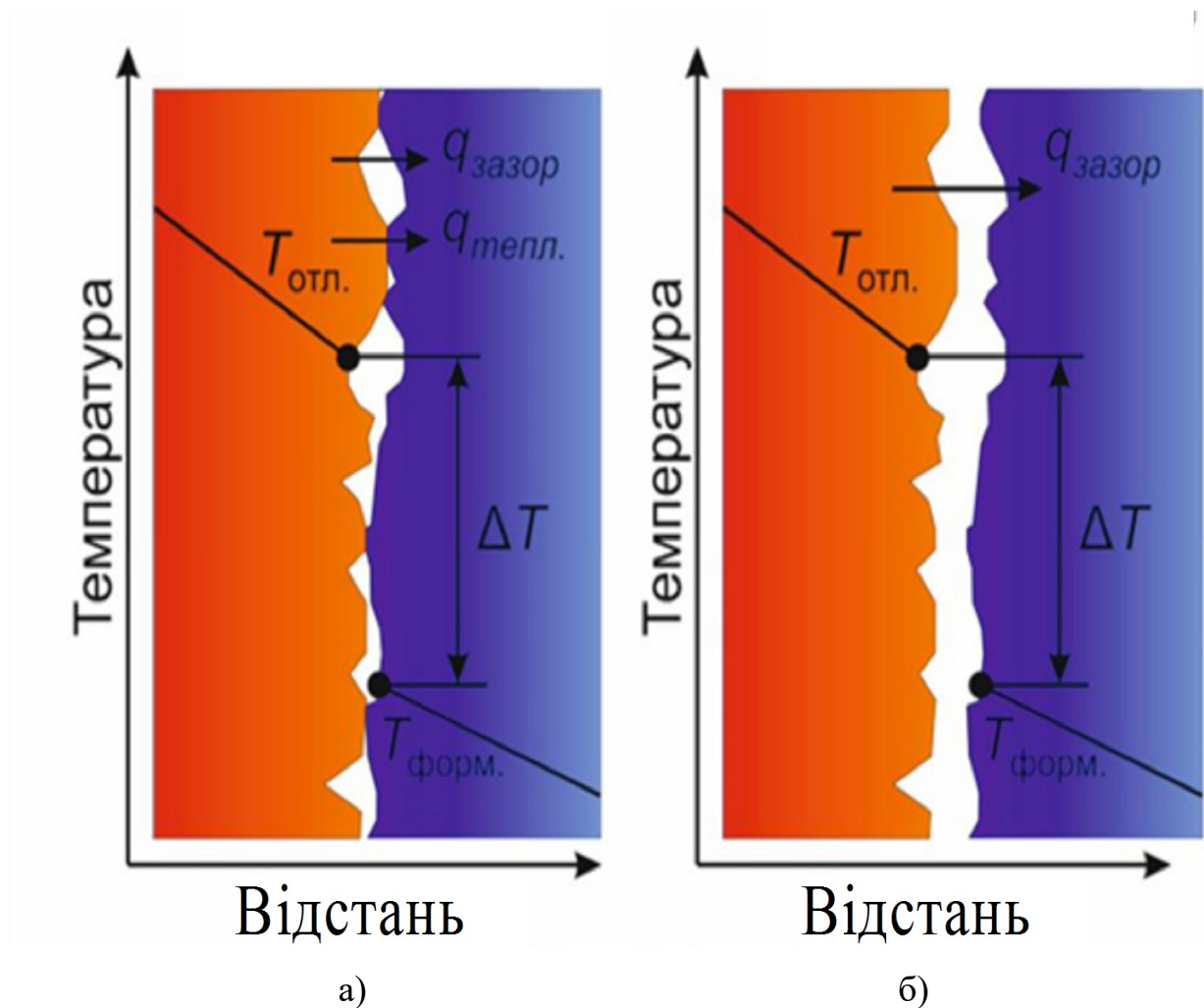


Рисунок 1.1– Зміна коефіцієнта теплопередачі під час затвердіння виливка:

а – до початку затвердіння виливка, б –в процесі затвердіння виливка

По мірі затвердіння виливка, лінійне розширення металевої форми і лінійна усадка виливка змінює ступінь контакту і розмір зазору між поверхнями виливка і форми. Цей процес обумовлює повну відсутність

контакту між виливком і формою, та зміни значення коефіцієнта теплопередачі під час затвердіння виливка (ІНТС):

$$\text{ІНТС} = q / (T_{\text{вил}} - T_{\text{ф}}),$$

де, q – кількість теплоти;

$T_{\text{вил}}$ – температура виливка;

$T_{\text{ф}}$ – температура форми.

Дана зміна обумовлює різке зниження коефіцієнта теплопередачі, так як тепло виводиться від виливка через відносно ізолюючий «повітряний зазор» за допомогою конвекції або випромінення, якщо температура поверхні виливку значно перевищує 800 °С [11]. У вакуумі конвекція відсутня, тому в цьому випадку основним механізмом передачі тепла буде кондукція до моменту утворення твердої кірки на поверхні виливка. Після початку затвердіння виливка і утворення зазору між виливкою і формою тепло при вакуумній заливці передається тільки випроміненням. Таким чином, коефіцієнт теплопередачі сильно залежить від реалізованої технології лиття і використовуваних матеріалів, і його величина в значній мірі змінюється в процесі затвердження.

1.2 Методики визначення коефіцієнту теплопередачі

Описаний метод хронометрування для визначення коефіцієнта теплопередачі, який полягає в порівнянні часу повного затвердіння виливка (по зникненню рідкої фази), отриманого експериментально, з розрахунковим часом затвердіння цього ж виливка при різних значеннях коефіцієнта теплопередачі, отриманим за допомогою математичного моделювання. Цей метод є найбільш простим для визначення коефіцієнта теплопередачі, однак має складність при визначенні тимчасового моменту закінчення затвердіння для сплаву, що має широкий інтервал кристалізації.

Автори роботи [12], отримали середнє значення коефіцієнта теплопередачі при литті алюмінієвих сплавів у піщано-глинисті форми, що

дорівнює $500 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. Але використання постійного коефіцієнта теплопередачі для розрахунків, які продовжуються нижче температури солідусу сплаву (наприклад, при вирахуванні напружень у виливках [13]), є некоректним. Як правило коефіцієнт теплопередачі визначають експериментально вимірюванням температури за допомогою термopар, що встановлюють в сплаві і формі або шляхом вимірювання зазору між виливком і формою. Перший спосіб (запис температури) дозволяє знаходити зміну значення коефіцієнта теплопередачі від часу або від температури [15-19]. Для моделювання кращим чином підходить залежність коефіцієнту теплопередачі від температури поверхні виливка, так як її можна застосувати для різних конфігурацій виливка. Залежність коефіцієнта теплопередачі від часу характерна тільки для того виливка, для якого вона була знайдена.

Для визначення величини коефіцієнта теплопередачі за експериментальними даними також використовують інверсійний метод [20-22]. Інверсійний метод визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою і формою, ґрунтується на аналізі температурних полів виливка в процесі затвердіння. Цей метод полягає у вирішенні зворотної задачі теплопровідності, при якій значення температурних полів, отримані експериментальним шляхом, слугують для знаходження коефіцієнту теплопередачі.

Інверсійний метод є більш точним і надійним, ніж метод хронометрування, оскільки дозволяє враховувати більш складні умови охолодження і геометрію виливка і форми.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою і формою часто використовується метод проб і помилок (trial and error). Це емпіричний метод, що ґрунтується на серії експериментів та аналізі їх результатів. Суть методу полягає в проведенні серії розрахунків в системі комп'ютерного моделювання ливарних процесів, в яких підбираються значення коефіцієнта теплопередачі, і в результаті порівняння експериментальних і розрахункових температурних полів. Для визначення коефіцієнта теплопередачі методом проб і помилок необхідно отримати експериментальні температурні поля у виливці і формі, а

також знати початкову температуру виливка і форму і час затвердження виливка. Після серії розрахунків вибирається оптимальне значення коефіцієнта теплопередачі на основі порівняльного аналізу експериментальних і змодельованих температурних полів. Метод проб і помилок є одним з найбільш простих і доступних методів визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою і формою, але при цьому він має деякі обмеження, такі як необхідність проведення більшої кількості експериментів і розрахунків, а також істотна залежність отриманих результатів від умов експерименту.

Основним критерієм, який дозволяє оцінити, наскільки експериментальні результати відрізняються від розрахованих, є функція помилок Err , що описує в загальному вигляді рівняння (1.1) [8]:

$$Err = \sum_{i=1}^n (t_p - t_e)^2 \quad (1.1)$$

де, Err – функція помилок,

t_p – розрахована температура в кожній точці,

t_e – експериментально визначена температура в кожній точці,

n – кількість вимірювань.

Чим менше значення Err , тим ближче порівнювані величини одна з одною (у разі визначення коефіцієнта теплопередачі це розраховані та експериментальні температурні поля у виливці та формі). У разі повного їх співпадіння значення функції помилок рівно нулю.

1.3 Результати визначення коефіцієнту теплопередачі.

Прабху та інші в роботі визначали значення коефіцієнта теплопередачі від часу інверсійним методом у випадку затвердіння чавуну в піщано-глинистих формах. Середнє значення коефіцієнта теплопередачі склало 625 Вт/(м² К).

Сачин та ін. визначили значення коефіцієнта теплопередачі між виливком з евтектичного сплаву на основі системи Al-Si і водоохолоджуваним кокілем з

мідного сплаву і сталі під час вертикального однонаправленого затвердіння. Значення коефіцієнта теплопередачі між виливком із сплаву Al-Si і мідним кокілем склало близько $19...9,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, а між виливом і сталевим кокілем значення коефіцієнта теплопередачі склало $6,5...5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Сюзта ін. розраховували еквівалентне значення коефіцієнта теплопередачі між алюмінієвим аналог АК7ч і формою з холоднотвердіючої суміші (ХТС) на фурановій зв'язці. У процесі лиття сплаву у формі з ХТС виявлено, що внизу значення коефіцієнту теплопередачі становить в межах $50...300 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$, а у верхній частині значення коефіцієнта теплопередачі становить $50...150 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$. Встановлено, що значення коефіцієнту теплопередачі змінюється в залежності від площі поперечного перетину виливка і зростає зі збільшенням площі поверхні поділу метал/форма.

Сан і Чао досліджували зміну коефіцієнта теплопередачі на межі між циліндричною алюмінієвою виливкою і піщано-глинистою формою. Було виявлено, що значення коефіцієнта теплопередачі досягало свого максимального значення відразу після заливки із-за ідеального контакту між металом і формою, а потім зпадало до мінімального значення, після чого знову зростало в результаті випаровування вологи. Нарешті, значення коефіцієнта теплопередачі поступово зменшувалося в результаті утворення повітряного зазору.

Термічний опір із-за повітряного зазору є важливою частиною протидії тепловому потоку на межі поділу метал/форма, і вплив повітряного зазору на охолодження та затвердіння теоретично обговорювалося багатьма дослідниками. Більшість попередніх робіт розглядали значення коефіцієнта теплопередачі як функцію часу [24-26]. Однак важко застосувати розрахунковий коефіцієнт теплопередачі, відповідний часу затвердіння, в реальних ситуаціях або в комп'ютерному моделюванні. Наприклад, Кім та ін. [12] помітили, що такі дані можна використовувати тільки для визначення відносного впливу різних параметрів на значення коефіцієнта теплопередачі.

Є достатньо даних про коефіцієнт теплопередачі між виливками зі сплаву АК7ч і піщаними формами. В роботі [29] при моделюванні процесу лиття алюмінієвого сплаву у форму з ХТС при температурі 800°C значення коефіцієнта теплопередачі склало $200 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ при температурі вище ліквідусу і $h_s=50 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ нижче температури солідуса. У роботі [30] також використовували низьке значення коефіцієнта теплопередачі для поверхні поділу алюмінієвий сплав - піщана форма ($42 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$), але це значення приймалося постійним. Значно більше значення коефіцієнта теплопередачі $1700...1800 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ у початковий момент часу, що відповідає температурі розплаву вище ліквідусу і $400 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ при температурі нижче солідусу, знайдено в роботі [19] при литті алюмінієвого сплаву в піщану форму, виготовленої по амін процесу. Автори роботи [11] визначили початкове значення коефіцієнта теплопередачі при литті алюмінієвого сплаву в піщану форму та отримали значення $3000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. Як видно, значення коефіцієнтів теплопередачі у вказаних вище роботах сильно відрізняються.

Даних про величину коефіцієнта теплопередачі між формами, де в якості наповнювача використовується кварцовий пісок, і виливками зі сплаву МЛ5 значно менше. На рисунку 1.2 показана залежність коефіцієнта теплопередачі від часу нагрівання та охолодження виливка для сплаву МЛ5 [15].

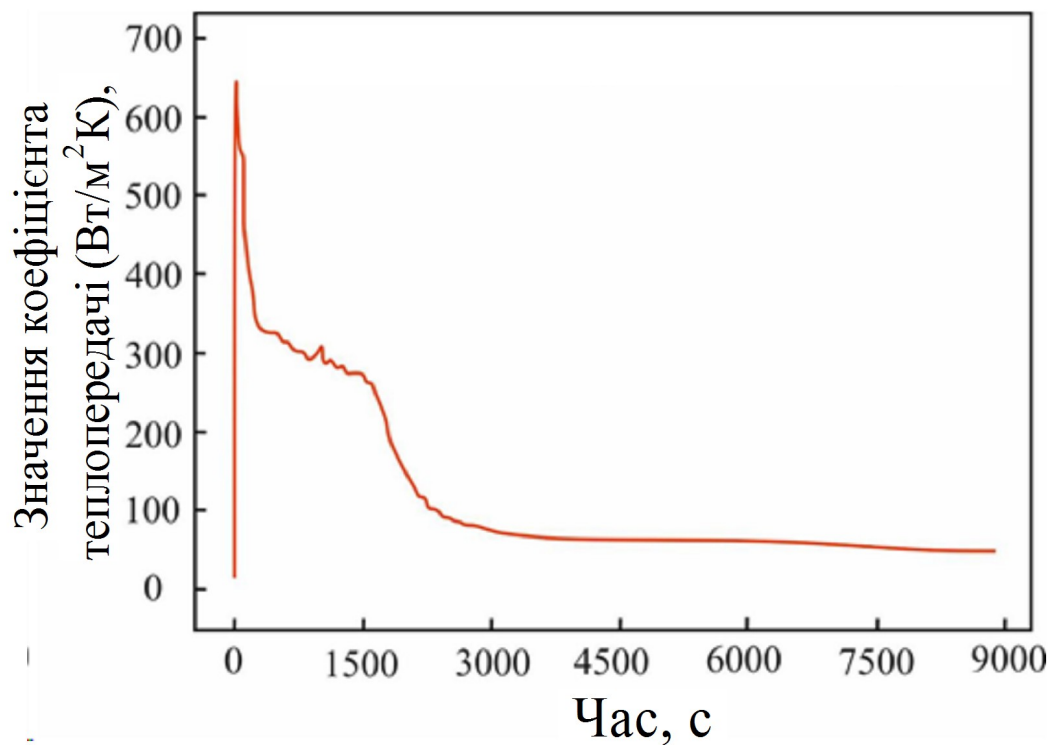


Рисунок 1.2 - Залежність коефіцієнту теплопередачі від часу між виливком з магнієвого сплаву МЛ5 та формою з ХТС

На рисунку 1.3 представлена залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливка з магнієвого сплаву МЛ5 при литті у форму з ХТС на фуранованій смолі. Коефіцієнт теплопередачі, при температурі ліквідуса 595°C склав $600 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ і температурі солідуса 554°C склав $50 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ [15].

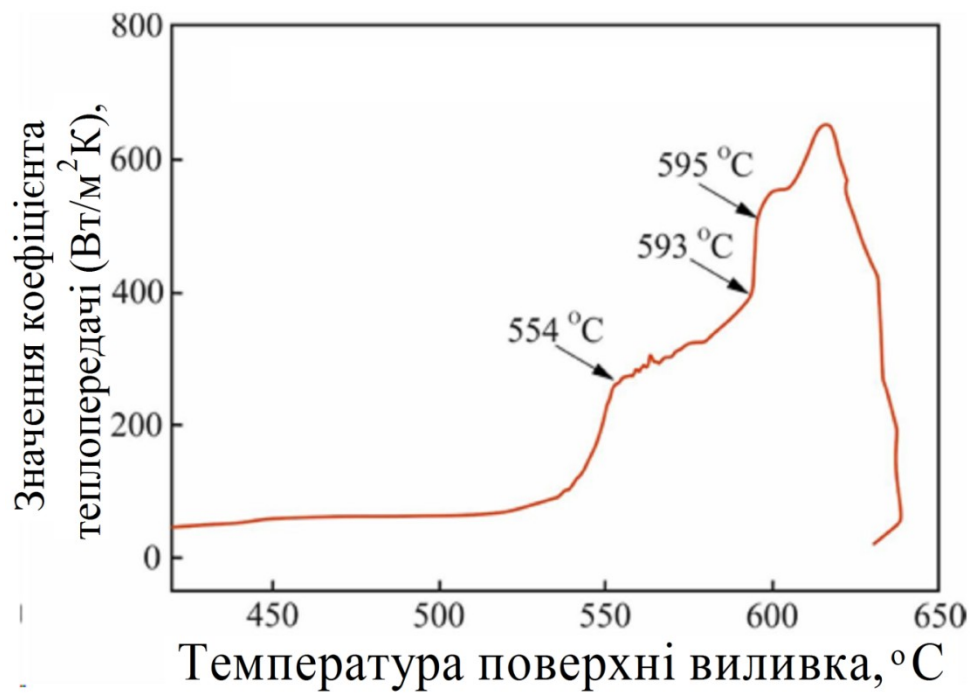


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні вилівка з магнієвого сплаву МЛ15 і форми з ХТС

Дані про коефіцієнти теплопередачі між алюмінієвим сплавом і формою із сталі при заливці кубічної вилівка із сплаву Al-13Si розміром $1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$ у піщано-глинисті форми зі встановленими на дні холодильниками зі сталі та меді такими ж розмірами. Коефіцієнт теплопередачі визначали шляхом порівняння експериментальних і розрахованих кривих охолодження при різних початкових значеннях коефіцієнта теплопередачі (ІНТС) в системі космпютерного моделювання ливарних процесів. Начальні значення коефіцієнта теплопередачі задавали від $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ до $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Після порівняння розрахункових і змодельованих температурних кривих автори [11] визначили, що для піщано-глинистої форми значення коефіцієнта теплопередачі становить $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, для сталевого і мідного холодильника значення коефіцієнта теплопередачі становить $7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Дані коефіцієнтів теплопередачі між алюмінієвим сплавом і формою з вуглецевої сталі з графітовим покриттям представлені в праці [31]. Експеримент проводився за допомогою металевої вилівниці, з товщиною стінки 26 мм, діаметром форми 102 мм, товщиною графітового покриття,

складала 100 мкм. Для виготовлення виливка використовували чистий алюміній 99,9%, температура заливання становила 760 °С. Максимальне значення коефіцієнта теплопередачі становило 760 Вт/м² К з моменту заливання виливка і до температури 610 °С, нижче цієї температури значення коефіцієнту теплопередачі різко знизилось до 450 Вт/м² К після чого поступово знизилося до 100 Вт/м² К при температурі 400 °С.

1.4 Сплави на основі системи Al-Si

Алюмінієві сплави залишаються базовими конструкційними матеріалами для перспективних виробів авіаційно-космічної техніки завдяки низькій щільності, комплексу експлуатаційних характеристик, хорошій технологічності, зварюваності та освоєності в металургійному виробництві. Їх склад, структура, режими виготовлення, в тому числі термомеханічної обробки, продовжують постійно вдосконалюватися у відповідності зі зростаючими вимогами до виробів [40].

Сплави на основі системи Al-Si широко використовуються в автомобільній, приладобудівній, машинобудівній промисловості. За вмістом кремнію сплави поділяються на доєвтектичні (<12%Si), евтектичні (Al-12Si) і заєвтектичні (>12%Si). Використовувані в даний час ливарні сплави цієї системи як правило мають вузький інтервал кристалізації і хороші ливарні властивості – невелику ливарну усадку, високу рідкотекучість, малу схильність до утворення тріщин при ускладненій усадці. Основними структурними компонентами подвійних доєвтектичних сплавів алюмінію з кремнієм є первинні кристали твердого розчину кремнію в алюмінію і двійникова евтектика (Al)+(Si) [41].

Однією з причин вибору сплавів на основі системи Al-Si для дослідження є їх хороша вивченість і можливість з достатньою точністю вирахувати їх теплофізичні властивості за допомогою термодинамічних баз, а також

перевірити вичислені властивості шляхом порівняння з наявними літературними даними.

Магній і його сплави вважаються перспективними для широкого спектру застосування в аерокосмічній, транспортній, електронній, біомедичній та енергетичній промисловості завдяки своїм чудовим фізичним і хімічним властивостям. Ці властивості включають низьку щільність, біосумісність, можливість вторинної переробки, а також підвищену ємність для акумуляторних батарей. Магнієві сплави можуть забезпечити значну економію ваги порівняно з традиційними матеріалами, такими як сталь і алюміній, що робить їх привабливими для виробів, де зниження ваги має вирішальне значення, наприклад, в аерокосмічній та авіаційній галузі. Крім того, магнітні сплави добре піддаються механічній обробці, що робить їх придатними для використання в електронних і біомедичних пристроях. Крім того, їх висока ємність для застосування в батареях робить їх перспективним матеріалом для розробки високопродуктивних накопичувачів енергії [42-44]. Однак низька міцність, відносно погана пластичність і корозійна стійкість магнієвих сплавів перешкоджають повномасштабному застосуванню магнію і його сплавів, з точки зору функціональності матеріалів [45]. За останні 10 років вчені досягли великих успіхів в області вдосконалення ливарних властивостей магнієвих сплавів [46,47,48].

1.5 Сучасні системи комп'ютерного моделювання ливарних процесів

Широке поширення системи комп'ютерного моделювання ливарних процесів значно спростило процес прогнозування результатів застосування ливарної технології на практиці.

За ініціативою Американської асоціації обчислювальної механіки та різноманіття програм комп'ютерного моделювання в 1999 р призвело до верифікації CAE-систем (V&V-процес).. Однак адекватність результатів комп'ютерного моделювання, отриманих з використанням різних програмних

продуктів, результатам, одержуваним при литті реальних виливків, не завжди однакові. Це пов'язано не тільки з реалізованою в тій або іншій програмі комп'ютерної моделі, але і з урахуванням при розрахунку теплофізичних властивостей матеріалів і граничних умов. Багатофакторність вирішуваної задачі призводить до того, що для достовірності результатів комп'ютерного моделювання необхідно їх обов'язкове поєднання з експериментом і подальше уточнення вихідних даних, застосовуваних в комп'ютерній моделі [22, 23].

Сьогодні в світі розраховується велика кількість програм для моделювання ливарних процесів. Основні проблеми при виборі конкретної програми для моделювання технологічних процесів складаються у відсутності достовірної інформації про можливості самої програми, принципах роботи з нею, а також у відсутності спеціалістів на підприємствах України. Суттєвим фактором для українських підприємств при виборі програм для моделювання ливарних процесів залишається її вартість [24], а також недоступність деяких програм для Українського ринку. У світовій практиці основне поширення отримали програми, представлені в таблиці 1.1 [25].

Таблиця 1.1 – Програми для моделювання ливарних процесів і країни розробник

Країна - розробник	програма	Країна - розробник	програма
Німеччина	Magmasoft	США	Flow3D

Німеччина	WinCast	США	Power Cast
Франція	PROCast	США	Solid Cast (AFSolid)
Франція	QuikCast	США	CAP Cast
Франція	PAM-Cast	США	RAPID/CAST
Франція	CalcoSoft	Корея	Any Casting
Іспанія	Vulcan	Фінляндія	Cast CAE
Японія	JSCAST	Україна	Autodesk Moldflow Adviser
Англія	Mavis-Flow	Індія	Auto Cast
Китай	InteCast	Австралія	Castflow Casttherm

Системи комп'ютерного моделювання ливарних процесів в загальному випадку не призначені для генерації технологічних параметрів. Їх призначення—показати, до чого приведе використання заданих технологічних параметрів. Іншими словами, показати хід процесів, від яких залежить прояв дефектів, процес утворення самих дефектів, їх розташування, характер та ін. Системи аналізу нічого не говорять про те, які технологічні параметри потрібно задати, але показують, що виходить, якщо ті чи інші технологічні параметри будуть задані. Варіюючи ці параметри (геометричні, технологічні, фізичні), можна підібрати таке їх поєднання, яке забезпечує стійку, бездефектну та економічно вигідну технологію [24].

При моделюванні ливарних процесів найбільш часто використовують наступні методи численного рішення: метод кінцевих елементів (МКЕ), метод кінцевих різниць (МКР) і метод кінцевих об'ємів (МКО). Два найбільш часто застосовуваних чисельних методи в системі комп'ютерного моделювання ливарних процесів - це МКЕ і МКР. Найбільш наглядно різниця між МКЕ і МКР видна за способом дискретизації геометрії, що продемонстровано на рисунку 1.4.

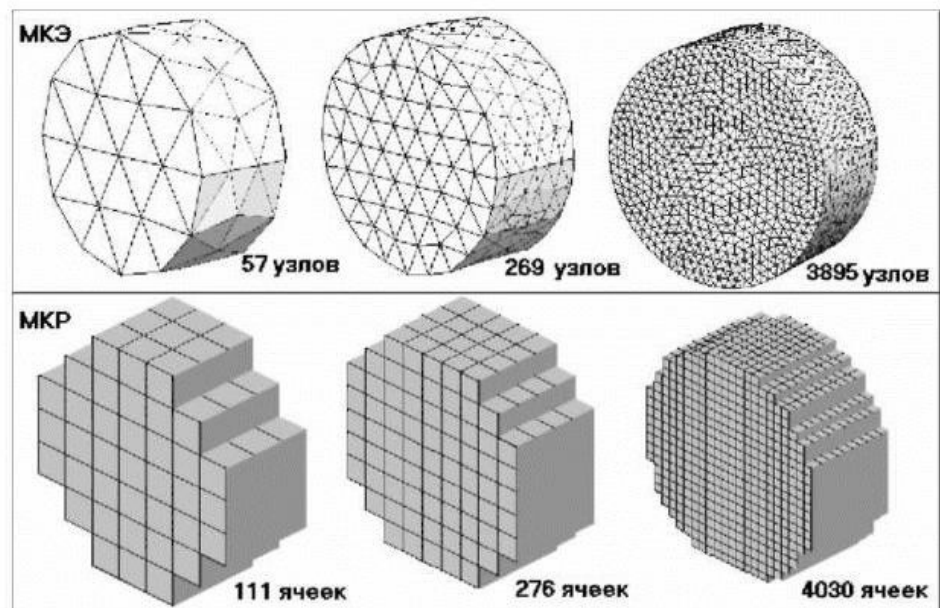


Рисунок 1.4 – Розрахункова сітка для моделювання виливка типу циліндра МКЕ вгору і МКР вниз при близьких значеннях густоти сітки

МКР більше тарий метод, саме з ним пов'язані перші успіхи численного моделювання. Рівняння МКР зазвичай формулюють як перетворення рівняння нестационарної теплопровідності (і аналогічних еліптичних диференціальних рівнянь теорії поля) за допомогою рядів Тейлора або прямої заміни виробничих різноманітних аналогів. Виходячи з розбивки у вигляді «кирпичів», в МКР при будь-якій ступені дискретності буде порушено співвідношення «об'єм/площа» - наприклад площа шару в МКР завжди буде рівна площі куба. У МКР можливі різні схеми розташування вузлів, в яких визначається потрібна функція (наприклад, температура) всередині різної комірки. З точки зору більш адекватного урахування граничних температур слід розташовувати вузли по вершинам різноманітного «кирпичика». Однак, в більшості різницевого систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів вузол розташовують в центрі комірки для полегшення рішення, що призводить до доповнюваним помилкам.

Метод кінцевих об'ємів (МКО) у певному сенсі є розвитком різницевого методів. Від МКР він відрізняється тим, що в граничних різницево-комірках враховуються довільно орієнтовані межі, «ВІДСІКАЮЧІ» від комірки довільний об'єм. Кінцево-елементний підхід більш молодий, більш математизований

тобто на рівні вихідних посилок точніше відповідає рівнянням задач теорії поля. Сітка МКЕ частіше всього являє собою набір тетраєдальних пірамід (рис. 4), що дозволяє принципово більш точно, ніж в МКР описати геометрію і не призводить до порушення співвідношення «об'єм/площу». Розрахункові вузли в МКЕ завжди знаходяться на реальній поверхні, що адекватно враховує граничні потоки, наприклад при наявності скачка шуканої функції на межі «виливка-форма». Однак головна відмінність МКЕ в тому, що в неї на рівні вихідних посилок передбачається розподіл шуканої функції (температура, ентальпій і т.д.) в об'ємі елемента – частіше всього лінійне. Відповідно МКЕ вимагає менше машинних ресурсів (менше оперативної пам'яті), розрахунок іде швидше (менше затрати процесорного часу), результат розрахунків може бути більш адекватним [26].

Метод кінцевих різностей (МКР), який використовується в таких програмах, як «MagmaSoft», «SolidCast», «CastCAE», «JSCAST», «Any Casting» та інших, дозволяє в короткі терміни отримати розподіл усадочних дефектів у проєктований виливках та вчасно виправити технологію лиття. Однак для усунення усадкової пористості у виливках відповідального призначення такі програми не підходять, оскільки даний математичний метод недостатньо добре працює у випадку тонкостінних виливів, коли товщина стінок стає рівною з кроком сітки. Пов'язано це з тим, що розбиття вихідної геометричної моделі відбувається шляхом накладання прямокутної сітки з постійним кроком, що призводить до різкого збільшення числа розрахункових комірок у разі отримання тонкостінних відливок більших габаритних розмірів [25].

Метод кінцевих елементів (МКЕ), що використовується в таких програмах, як «Polygon», «WinCast» та ін., дозволяє максимально врахувати геометрію виливка і виявити навіть незначні дефекти. Пов'язано це з розбиттям вихідної геометричної моделі виливка на кінцеві елементи (частіше всього - тетраедри). Вбудовані генератори сіточної моделі в самих програмах дають більші погрішності. Проблема вирішується шляхом використання зовнішнього генератора сітки KE, що призводить до здорожчання придбаного програмного

забезпечення, часу роботи, а також вимагає від персоналу високої кваліфікації [27].

Метод контрольних об'ємів (МКО) (використовується в програмах «Flow-3D», «LVMFlow») поєднує в собі простоту і факторизацію МКР і хорошу апроксимацію меж між різними матеріалами і різними фазами. Це дозволяє проводити моделювання максимально швидко, не втрачаючи при цьому точності розрахунків. «LVMFlow» – єдина повноцінна програма для моделювання ливарних процесів, яка використовує даний метод. Програма «LVMFlow» також використовує МКО і є лідером для розрахунку гідродинамічних задач, однак не є значною мірою призначеною для процесів лиття, тому не так часто використовується для вирішення досліджуваних задач.

З перерахованих програм ESI Group «Moldflow» представляє широкий набір додатків, модулів та інструментів для задоволення самих серйозних виробничих потреб для ливарної промисловості. Система комп'ютерного моделювання ливарних процесів «Moldflow», заснована на МКЕ, також здатна прогнозувати виникнення деформацій і залишкових напружень у виливках і може застосовуватися для аналізу таких процесів, як виготовлення стержневого, центробіжного лиття, лиття за випалюваними моделями, безперервне лиття. «Moldflow» постачається з 3D генератором тетрагональної сітки і засобом читання та аналізу геометрії ізCADсистем. Розрахунок течії описується повним рівнянням Нав'є-Стокса і може розраховуватися разом з аналізом температури і напружень. У вирішувачі створені спеціальні моделі для аналізу турбулентних потоків, тиксотропних або твердодірких матеріалів, центр обіжного лиття, лиття по випалюваних моделях і виробництва стержнів. Термічний вирішувач дозволяє розраховувати тепловий потік з урахуванням теплопровідності, конвекції та випромінення. За допомогою ентальпії враховується тепловиділення, пов'язане і зміна фазового складу при кристалізації і в твердому стані. З програмою «Moldflow» поставляється велика база даних матеріалів для ливарних моделей. Її наповнення постійно збільшується достовірними даними, перевіреними в умовах діючого

виробництва. В «Moldflow» включена унікальна термодинамічна база даних, яка дозволяє користувачеві, використовуючи хімічний склад сплаву, автоматично отримувати температурні властивості, необхідні для проведення точного розрахунку ливарного процесу. Також програма має ряд функцій, які необхідні для визначення коефіцієнта теплопередачі, такі як: побудова температурних кривих для заданих точок (вузлів) в моделі, та побудова графіку залежності коефіцієнт теплопередачі від часу або температури.

Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.

1. Величина коефіцієнта теплопередачі залежить від багатьох параметрів, таких як температура поверхні виливка, теплофізичних властивостей матеріалів виливка і форми, тиску, величини зазору, що з'являється при усадці виливка і тепловим розширенням форми, шорсткістю поверхні форми та атмосферу в зазорі виливок-форма, товщину і склад фарб і покриттів.

2. Значення коефіцієнта теплопередачі між виливкою та ливарною формою сильно залежить від реалізованої технології лиття і використовуваних матеріалів, і його величина в значній мірі змінюється в процесі затвердження.

3. Для визначення величини коефіцієнта теплопередачі існують різні методики. Інверсійний метод є більш точним і надійним, ніж метод хронометрування, оскільки дозволяє враховувати більш складні умови охолодження і геометрію виливка і форми. Для визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою і формою часто використовується метод проб і помилок (trialanderror). Але основним критерієм, який дозволяє оцінити, наскільки експериментальні результати відрізняються від розрахованих, є функція помилок *Err*.

4. Для визначення коефіцієнта теплопередачі були вибрані широко відомі сплави на основі системи Al-Si з різним інтервалом кристалізації, що використовуються в ливарному виробництві, а також сплав МЛ5. Матеріал для виготовлення форми був обраний сталь.

5. В сучасних умовах точні знання теплофізичних властивостей матеріалів форм та ливарних сплавів, а також значення коефіцієнта теплопередачі на межі поділу метал-форма дають широкі можливості для моделювання ливарних процесів.

Однак, точне вирахування коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою є складною задачею, і як правило його визначають експериментальним шляхом, але в сучасних умовах поширена тенденція на процес комп'ютерного моделювання, що дозволяє значно поліпшити прогнозування дефектів у виливках.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі було обрано метод мінімізації функції помилок, що ґрунтується на порівнянні експериментальних та розрахункових значень температур у процесі заливання, затвердіння та охолодження виливки та форми.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі було вибрано широко відомі сплави на основі системи Al-Si з різним інтервалом кристалізації, а також сплав МЛ5

На основі літературного аналізу та поставленої мети в магістерській роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати способи визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою та формою при литті ливарних алюмінієвих сплавів.

2. Запропонувати лабораторну установку для дослідження процесу теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем.

3. Розробити методику визначення значення коефіцієнта теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем.

4. Вибрати основні методики дослідження хімічного складу ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si.

5. Провести аналіз температурних залежностей коефіцієнтів теплопередачі між алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 та формою зі сталі.

6. Провести експериментальні дослідження впливу інтервалу кристалізації ливарних алюмінієвих сплавів Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5 при заливанні в кокіль на вид температурної залежності коефіцієнта теплопередачі.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ

ДОСЛІДЖЕНЬ ЛИВАРНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

2.1 Характеристика та приготування сплавів системи Al-Si

В роботі був використаний сплав на основі алюмінію з різним вмістом кремнію: Al-3% Si, Al-7%Si, Al-12%Si (ДСТУ 11069-2001) а також поширений магнієвий сплав МЛ5. Для приготування сплаву Al-7Si використовували чушки готового сплаву АК7ч (ДСТУ 1583-93) [30] вмісту Mg у сплаві значення не надавали. Для приготування сплаву Al-3%Si і Al-12%Si в якості шихтових матеріалів використовували алюміній марки А85 (ДСТУ ГОСТ 11069-2003) [32] і кремній марки Кр0 (ГОСТ 2169-69) [33]. Хімічний склад сплаву Al-3% Si, Al-7%Si та Al-12%Si, що використовували в магістерській роботі наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад ливарних алюмінієвих сплавів Al-3% Si, Al-7%Si, Al-12%Si

Сплав	Вміст компонентів, %						
	Al	Si	Mg	Mn, до	Fe, до	Cu, до	Zn, до
Al-3Si	реш.	2,81	0,02	0,01	0,10	0,19	0,01
Al-7%Si	реш.	7,20	0,50	0,002	0,06	0,04	0,003
Al-12Si (АЛ2)	реш.	11,07	0,06	0,05	0,339	0,20	0,06

Експериментальні плавки проводили у високочастотній індукційній печі ІСТ-0,06. Після повного розплавлення шихтових матеріалів виробляли інтенсивне перемішування графітовою мішалкою, знімали шлак, а для видалення розчиненого водню проводили рафінування гексахлоретаном (C₂Cl₆). Гексахлоретан вводили в розплав «колокольчиком» при температурі 760 °С. Далі проводили витримку 10...15 хв і знімали шлак. Температуру заливки контролювали хромель-алюмелевою термопарою.

Приготовлений розплав розливали при температурі 720 °С у сталевих виливницях. Отримані сплави багатократно використовувалися для проведення експериментів. Після кожного дослідження сплави переплавляли. Хімічний склад сплаву контролювали після проведення серії дослідів.

2.2 Характеристика та плавка ливарного магнієвого сплаву МЛ5

Також в даній магістерській роботі використовувався поширений магнієвий сплав МЛ5. Структура сплаву МЛ5 складається з магнієвого твердого розчину та інтерметаліди $Mg_{17}Al_{12}$, який сильно впливає на механічні властивості сплаву МЛ5. Із-за великої кількості експериментальних робіт, проведених на сплаві МЛ5, його теплофізичні властивості, такі як питома теплоємність, теплопровідність, а також щільність, можуть бути розраховані за допомогою термодинамічної бази та перевірені шляхом порівняння з експериментальними даними. Хімічний склад сплаву МЛ5, що використовували в магістерській роботі наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад сплавів ливарного алюмінієвого сплаву МЛ5 виливків за ДСТУ 2839-94 [16]

Хімічний склад сплавів ливарного алюмінієвого сплаву МЛ5, %									
Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Zr	Be	Mg	Zn
до 0.06	до 0.25	0.15 - 0.5	до 0.01	7.5 - 9	до 0.1	до 0.002	до 0.002	89.1 92.15	0.2 - 0.8

Для приготування магнієвого сплаву МЛ5 (ГОСТ 2856-79) [34] використовували магній марки Мг90 (ГОСТ 804-93) [65], алюміній А99, цинк Ц0 (ГОСТ 3640-94) [36] і лігатуру А1-10% Мп приготувану з використанням алюмінію А99. Перед плавкою проводили очищення сталевих тигля, тигель нагрівали до температури 700 °С. Після цього проводили промивку для очищення сталевих тигля від залишків попередньої плавки чистим магнієм марки Мг90, який нагрівали до температури 720...740 °С, і далі зливали магній в ложницю. Шлак зі стінок тигля очищали сталевим мішалкою.

Експериментальні плавки проводили у високочастотній індукційній печі ІСТ-0,06. Після повного розплавлення шихтових матеріалів виробляли інтенсивне перемішування графітовою мішалкою, знімали шлак. На дно тигля поміщався чистий магній марки Мг 90. Після розплавлення чистого магнію, при температурі магнію 740...760°C, була додана лігатура Al-10%Mn і витримана протягом 10 хвилин для повного розчинення лігатури в розплаві. Після цього додавали чистий алюміній А99 і цинк Ц0, і витримували ще 5 хвилин. Розплав перемішався для повного змішування компонентів з додаванням карналітового флюсу ($KCl+MgCl_2$), який передував горінню магнію і очищав розплав від шлаків і неметалічних включень. Потім сплав розливався в металеві викладки при температурі 740°C.

Для проведення експериментів отримані чушки розділяли на заготовки масою близько 100...200 грам для подальшої переплавки сплаву в індукційній печі і заливки в різні форми з установленими термопарами.

2.3 Установка для дослідження процесу теплопередачі між ливарним алюмінієвим сплавом та кокілем

В магістерській роботі для дослідження процесу теплопередачі між ливарним алюмінієвим сплавом та кокілем використовували ливарну форму зі сталі. Сталь є одним із матеріалів, які зазвичай використовуються для виготовлення кокілів і прес-форм для лиття під тиском.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі на межі розділу металу - форма необхідно отримати графіки зміни температури в різних точках (температурні поля) в залежності від часу. Вданій магістерській роботі для зняття експериментальних температурних полів використовувалась металева форма. У формі встановлювали хромель-алюмельні термопари на різній відстані від поверхні метал-форми, відстань і розташування термопари для форми визначалося виходячи з геометричних особливостей форми.

У якості форми була використана виливниця зі сталі 20 для отримання циліндричних виливків, загальний вигляд металевої форми представлений на рисунку 2.1.

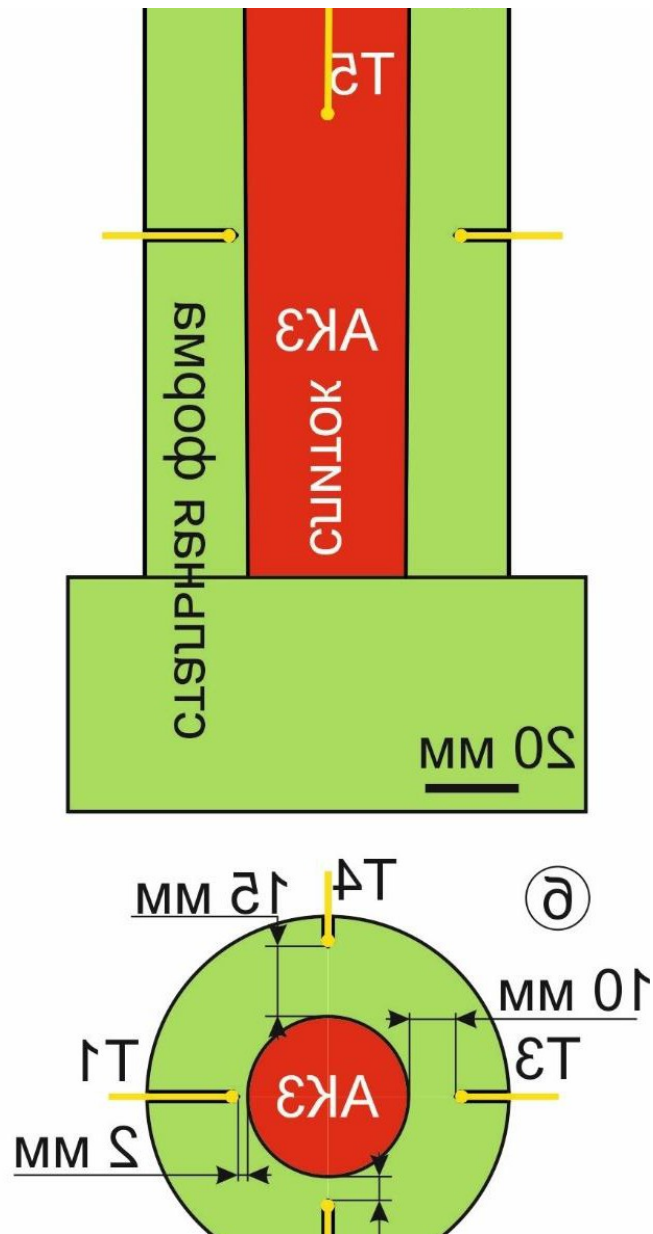


Рисунок 2.1 – Загальний вид виливниці зі сталі 20 з встановленими термопарами

При заливці отримували циліндричний виливок, який мав висоту 120 мм і діаметром 30 мм, при цьому товщина форми стінок становила 25 мм.

Форма виготовлена із сталі 20 (ДСТУ 2651:2005) [32], хімічний склад був визначений за допомогою стаціонарного іскрового оптико-емісійного спектрометра. Торці даної виливниці були відфрезеровані на універсально-

фрезерувальному верстаті 675. В зовнішній стінці форми були просвердлені чотири отвори діаметром 2 мм різної глибини, в яких за допомогою термоклею були закріплені хромель-алюмелеві термопари, які розташовувалися на відстані 2, 5, 10 і 15 мм від внутрішньої стінки виливниці. Схема розташування термопар показана на рисунку 2.2.

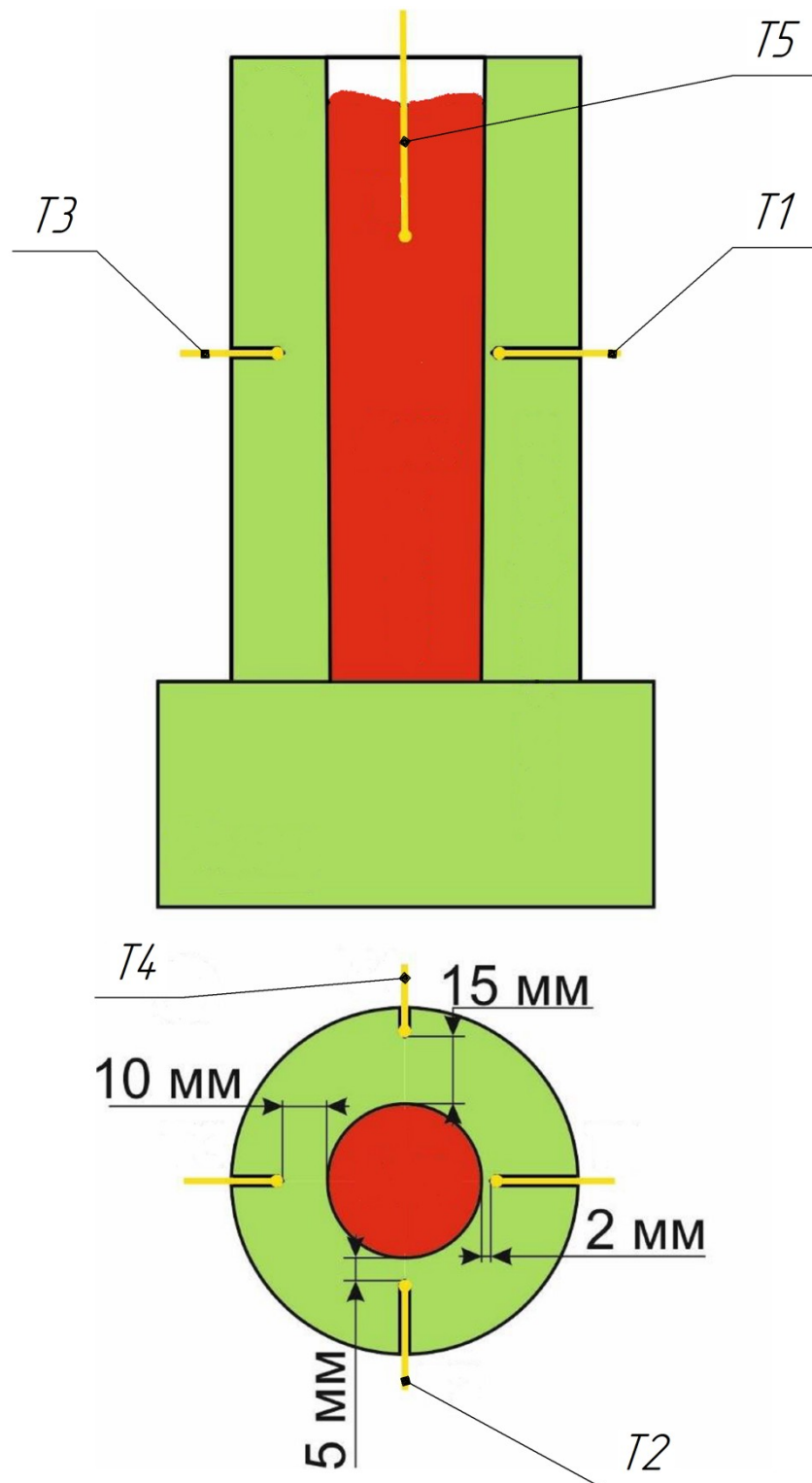


Рисунок 2.2– Схема розташування термопар у формі зі сталі 20
форма в розрізі вид форми зверху

Після приготування сплавів на основі Al (Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si), Mg (МЛ5) та металевої форм виконували заливання з одночасним записом експериментальних температурних полів за допомогою термовимірювача. Сплави заливали з різною температурою. Запис для кожної термопари знаходиться у формі та безпосередньо у виливку повторювали від 2 до 5 разів. Тривалість запису в середньому становила від години до двох годин, за цей час форма встигала охолонути до температури 40-50 °С, після чого виливок витягували з форми та давали формі охолонути до кімнатної температури, далі повторювали експеримент.

В роботі була визначена шорсткість внутрішньої поверхні форми. Відомо, що в процесі використання форми її шорсткість може змінюватися, тому вимірювання проводилися після завершення досліджень. Шорсткість внутрішньої поверхні форми складала $R_z = 25$ мкм і $R_a = 4$ мкм.

2.4 Методика визначення хімічного складу ливарного алюмінієвого сплаву

Для розрахунку теплофізичних властивостей сплавів і форми зі сталі визначали склад сплавів. Оскільки зміст основних та домішкових елементів у сплавах може змінюватися в процесі його переплаву склад сплавів аналізували і після кожних 5 переплавів. Значних відмінностей виявлено не було, тому в роботі наводиться склад сплавів після приготування.

Для визначення хімічного складу сплавів використовувалися циліндричні плоскопаралельні зразки, відрізані від низу зливка заввишки 10 мм. Потім зразки зачищалися на наждачному папері зернистістю 200, 400, 600 Р, і після цього визначався хімічний склад за допомогою багатоканального оптичного емісійного спектрометра.

Висновки до другого розділу

1. Запропонувати лабораторну установку для дослідження процесу теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем.
2. Розробити методику визначення значення коефіцієнта теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем.
3. Вибрати основні методики дослідження хімічного складу ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МІЖ ЛИВАРНИМ АЛЮМІНІЄВИМ СПЛАВОМ СИСТЕМИ AL-SI І КОКІЛЕМ

3.1 Визначення коефіцієнта теплопередачі при заливанні ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si і кокілем

В ході даної роботи були визначені коефіцієнти теплопередачі між виливками із сплавів Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si, МЛ5 та кокілем зі сталі 20. Розрахунок температурної залежності коефіцієнта теплопередачі отримували шляхом мінімізації функцій помилок. Оскільки в даному випадку температура у виливку і у формі змінюються більш інтенсивно, вид залежності коефіцієнта теплопередачі від температури може бути більш складним, і задавати його потрібно буде більше ніж за двома точками (постійне значення вище температури ліквідусу і постійне значення нижче температури солідусу). Тому окрім даних точок, потрібні проміжні температурні точки.

Розрахункові значення функції помилки t_{err} (°C), обчислені за формулою (1.1) для областей значень коефіцієнта теплопередачі при температурі ліквідусу (h_L) в інтервалі 400...800 Вт/(м²)·K і при температурі солідусу (h_s) в межах 100...500 Вт/(м²)·K представлені на рисунку 2.1 (а). Можна бачити, що величина помилки зменшується зі збільшенням значень коефіцієнта теплопередачі при температурі ліквідусу h_L і солідусу h_s і шукана величина коефіцієнта теплопередачі має більш високе значення, що не вкладається в заданий діапазон.

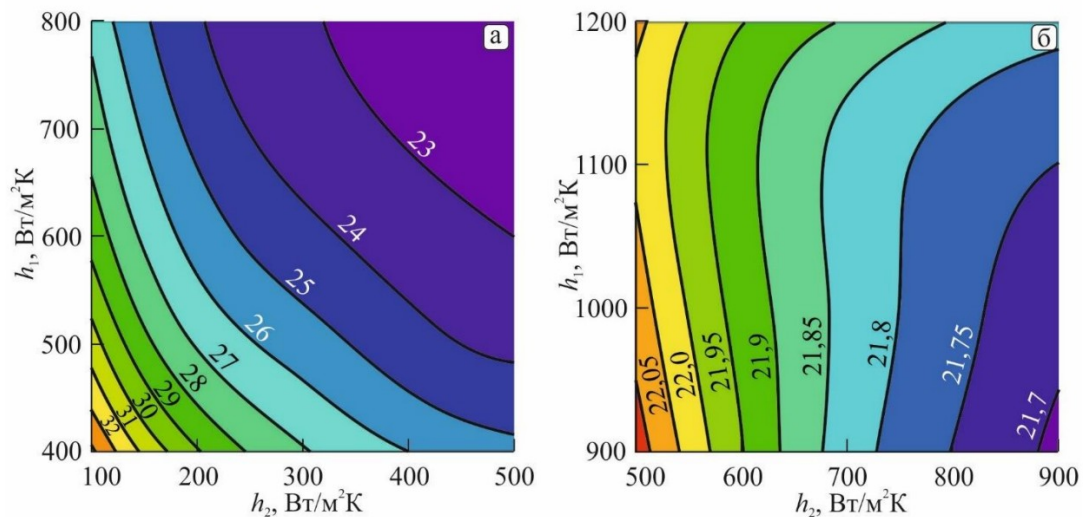


Рисунок 3.1 - Розрахункові величини функції помилки t_{Err} (°C) для областей значень коефіцієнта теплопередачі: а) $h_L = 400 \dots 800$, $h_S = 100 \dots 500$ Вт/(м² · К); б) $h_L = 900 \dots 1200$, $h_S = 500 \dots 900$ Вт/(м²В · К)

На рисунку 3.1, (б) наведено результати розрахунку функції помилки t_{Err} (°C) для значень коефіцієнта теплопередачі при температурі ліквідусу сплаву h_{LV} межах 900...1200 Вт/(м²В/(м²)К) та від температури солідусу сплаву h_S в межах 500...900 Вт/(м²В/(м²)К). В області цих значень коефіцієнта теплопередачі величина функції помилок практично не змінюється і знаходиться в межах 21,6...22,1 °C. Дане можна пояснити невеликим зміщенням положенням термопар відносно положення розрахункових точок в моделі.

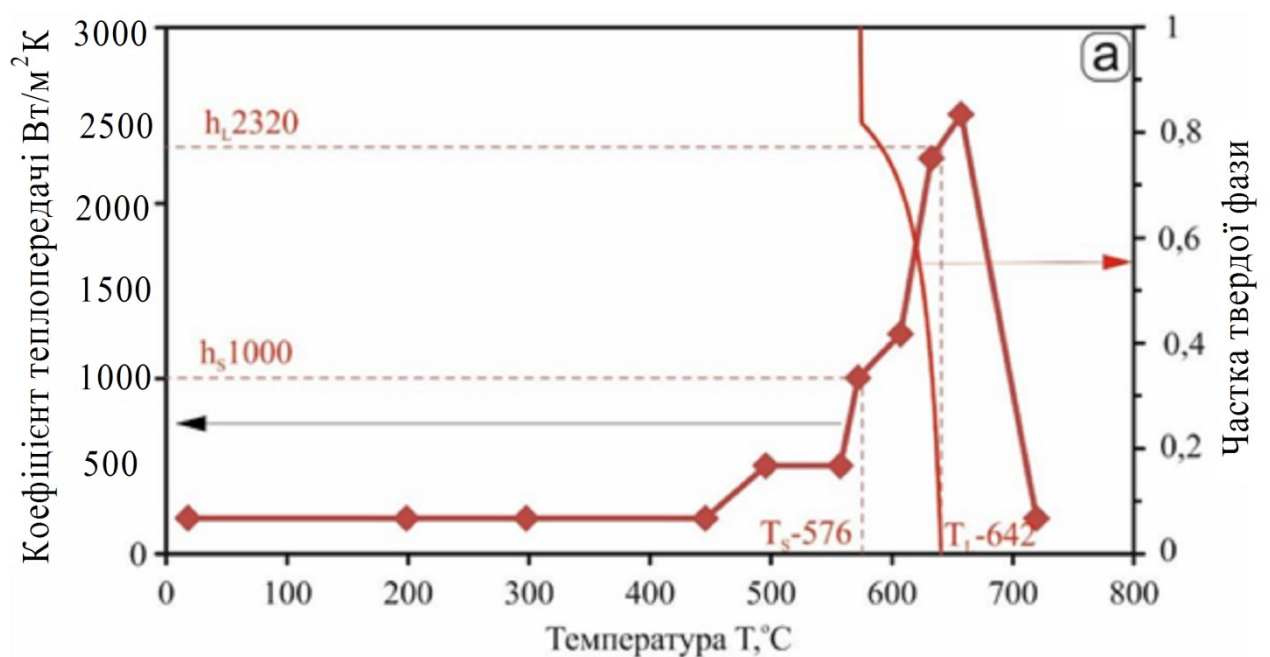
Таким чином, для визначення значення коефіцієнта теплопередачі є показники термопар, що розміщені безпосередньо на границі контакту металу з формою (Т1, Т2) – мінімальне значення функції помилок для них було отримано за значення коефіцієнта теплопередачі h_L рівному 900 Вт/(м²К) і h_S дорівнює 600 Вт/(м² · К).

3.2 Результати визначення коефіцієнта теплопередачі при заливанні сплавів Al-Si у форму зі сталі 20

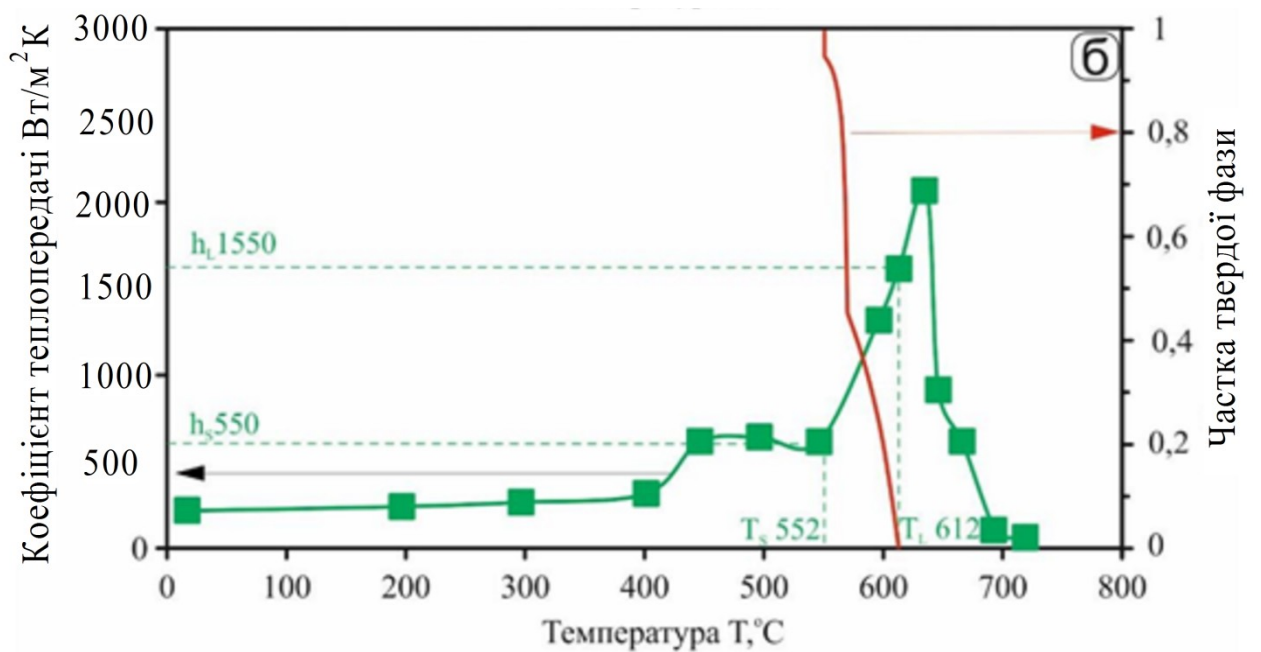
Значення коефіцієнта теплопередачі отримували у вигляді графіка залежно від температури поверхні виливки. Для визначення різниці між

експериментальними та розрахованими температурними полями використовували функцію помилок. Значення функції помилок неоднакове як для термопар, що знаходяться на різних рівнях (за висотою), так і для термопар, встановлених на одному рівні, але що розташовуються на різній відстані від поверхні виливки. Для визначення коефіцієнта теплопередачі найважливішими є показання термопар, розміщених безпосередньо на границі контакту металу із формою.

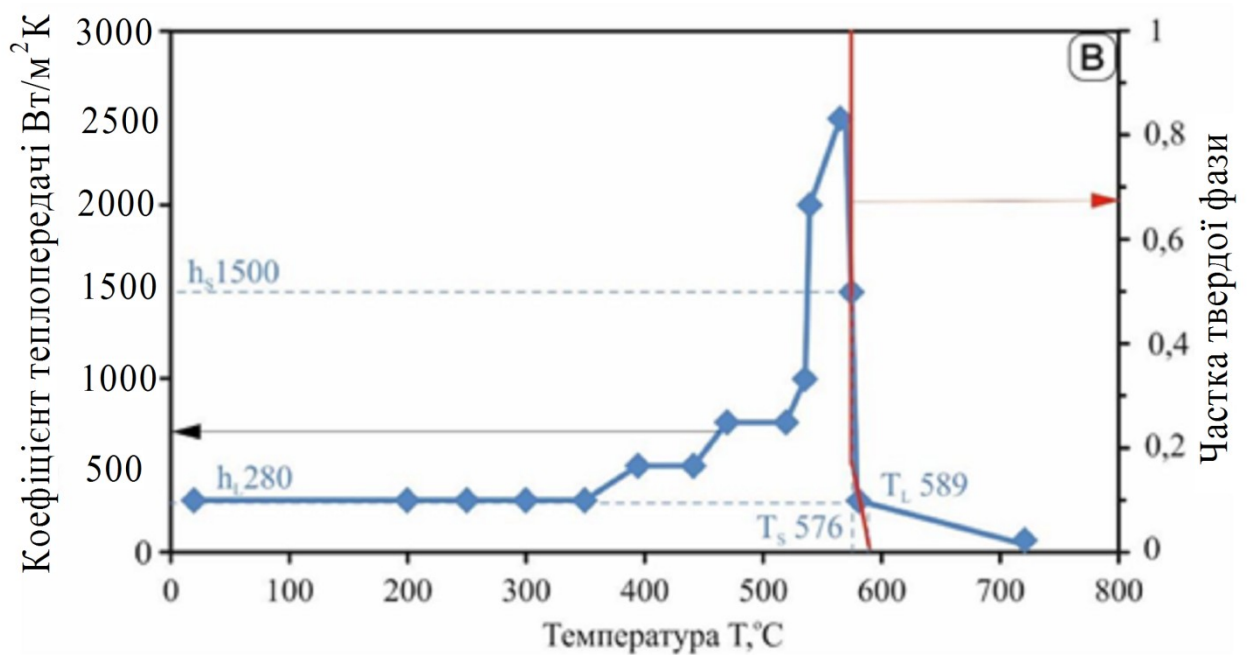
Для сплавів Al-7Si та МЛ5 температурні поля були зафіксовані впротягом перших 1500 секунд з початку заливки. На рисунку 3.2 зображені графіки залежності коефіцієнтів теплопередачі від температури поверхні виливків, виготовлених із сплавів Al-3Si (а), Al-7Si (б), Al-12Si (в), що заливали у форми зі сталі 20.



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні вилівка із сплавів: Al-3Si (а), Al-7 Si (б), Al- 12 Si (в) при заливаннів кокіль зі сталі 20.

Графіки залежно для сплавів Al-3Si, Al-7Si і Al-12Si схожі, але мають деякі відмінності. Для всіх сплавів спостерігається зростання коефіцієнта теплопередачі від температури заливання 720°C до температури, близької до

температури ліквідусу сплаву. При цьому значення коефіцієнта теплопередачі в цьому випадку максимально і становить $2000...2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Це пов'язано з тим, що саме при температурі ліквідусу починається формування кристалів на поверхні форми, які добре притискаються до розплаву поверхні за рахунок гідростатичного напору. При цьому процеси усадки ще не почалися і зазор між кіркою сплаву і формою ще не почали формуватися.

Для сплаву Al-3Si коефіцієнт теплопередачі склав $2320 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$ при температурі $T_L 576^\circ\text{C}$, для сплаву Al-7Si - $1550 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ при температурі $T_L 612^\circ\text{C}$, а для сплаву Al-12Si значення коефіцієнта теплопередачі склало всього $280 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$ при температурі T_L рівній 589°C . Тобто коефіцієнт теплопередачі саме при температурі ліквідусу не максимальний.

Слід зазначити, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі для сплаву Al-3Si становить $2600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ при температурі 658°C . Для сплаву Al-12Si рисунок 3.2 (в) на криву залежність можна спостерігати, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі 556°C і становить $2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Для сплаву Al-7Si також не спостерігається максимального значення коефіцієнта теплопередачі при температурі ліквідусу, воно досягається при температурі поверхні виливка 633°C і становить $2050 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Зазначимо, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі вище, ніж температура ліквідації сплаву для всіх сплавів, крім сплаву Al-12Si. Для даного сплаву максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі нижче твердого сплаву. По всій видимості це пов'язано з тим, що для сплавів Al-3Si і Al-7Si розрахована температура ліквідусу кілька відрізняється від експериментального. Ще одна причина може бути розглянута раніше інерційність термопар. Що ж стосується сплаву Al-12Si, то врахувати, що від розрахованої температури ліквідусу (589°C) до температури евтектичного перетворення (576°C) спостерігається формування невеликої кількості

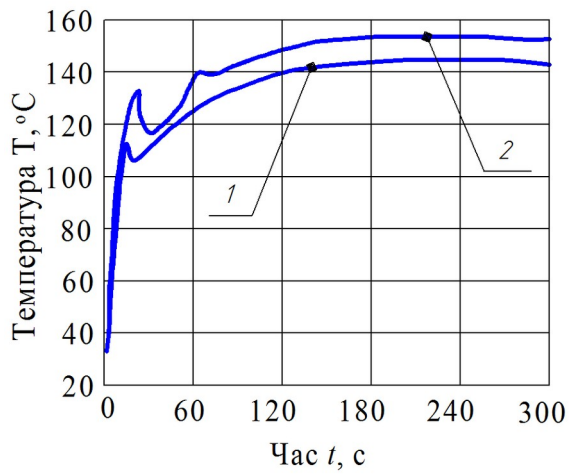
первинних кристалів, і за всією видимістю вони не здатні забезпечити хороший тепловий контакт між виливком і формою.

При температурах соліду 576°C , 552°C , 576°C для трьох сплавів - Al-3Si, Al-7Si і Al-12Si - значення коефіцієнта теплопередачі склали відповідно $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, $550 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ і $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Можна бачити, по мірі зростання долі твердої фази в сплаві (рис. 3.2) відбувається значне зниження коефіцієнта теплопередачі. Особливо добре виражено для сплавів Al-3Si і Al-7Si. Що ж стосується сплаву Al-12Si, то для нього основне зміна коефіцієнта теплопередачі відбувається нижче температури соліду. По всій видимості, незважаючи на дуже короткий інтервал кристалізації, зміна коефіцієнта теплопередачі відбувається в інтервалі температури.

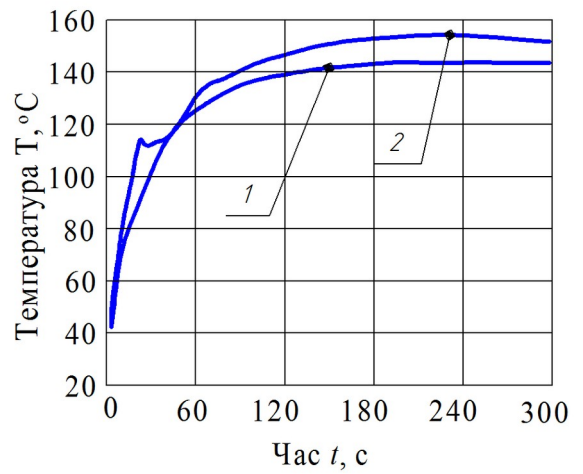
Значення коефіцієнта теплопередачі для трьох сплавів залишається практично незмінним від температури поверхні відливу 400°C і до кімнатної температури 20°C і становить $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Таким чином, можна прочитати, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається поблизу температури ліквідусу сплаву. По мірі протікання процесу затвердіння і формування твердої корки коефіцієнт теплопередачі починає знижуватися із-за формування зазору між відливом форми. Нижня температура солідуса на графіках зміни коефіцієнта теплопередачі мають площі, ширина яких збільшується за рахунок збільшення вмісту кремнію в сплаві. За всією видимістю, наявність цієї площадки може бути пов'язано з евтектичним перетворенням, так як її ширина збільшується зі збільшенням долі евтектики в сплаві.

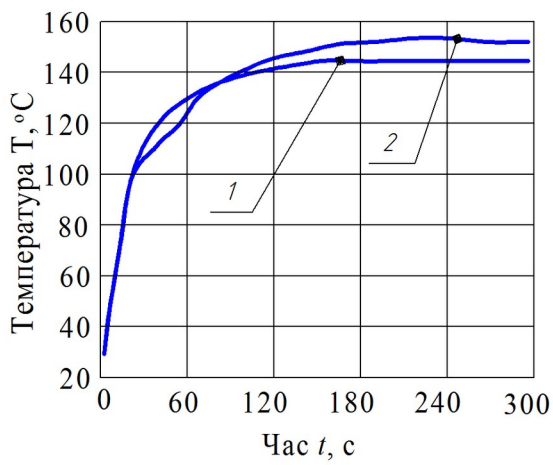
На рисунку 3.3 представлені температурні поля для термопар T1-T4, отримані в ході експерименту (поз. 1), розрахункові температурні поля при використанні знайденої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури представлені на рис. 3.2



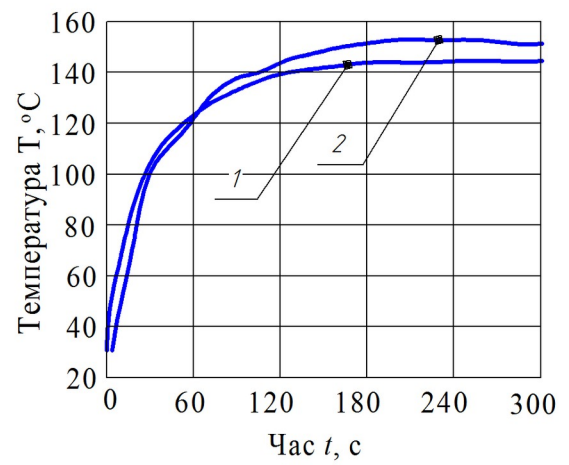
а)



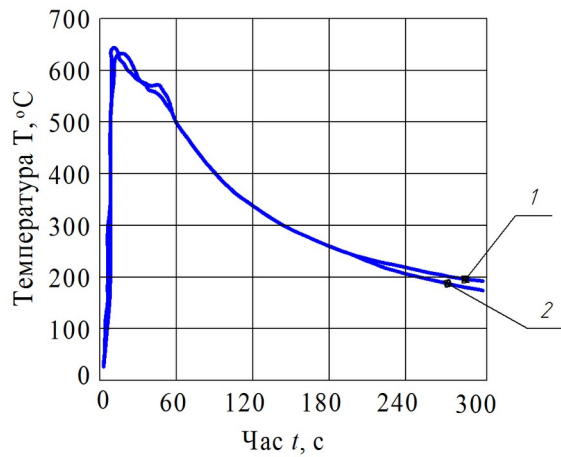
б)



в)



г)

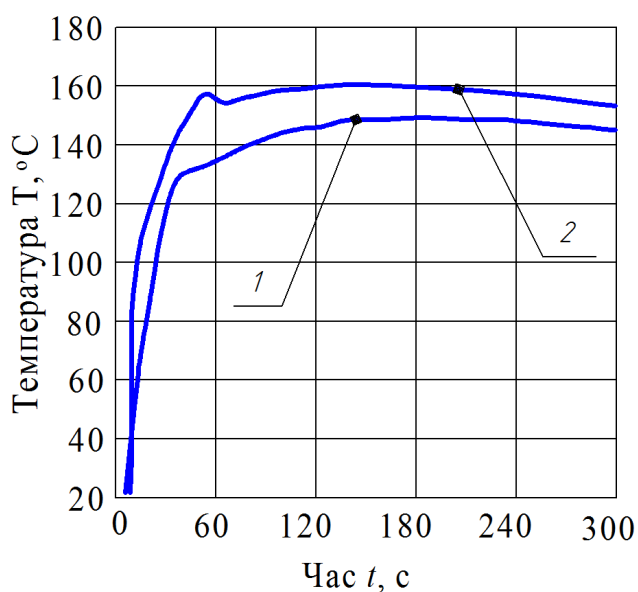


д)

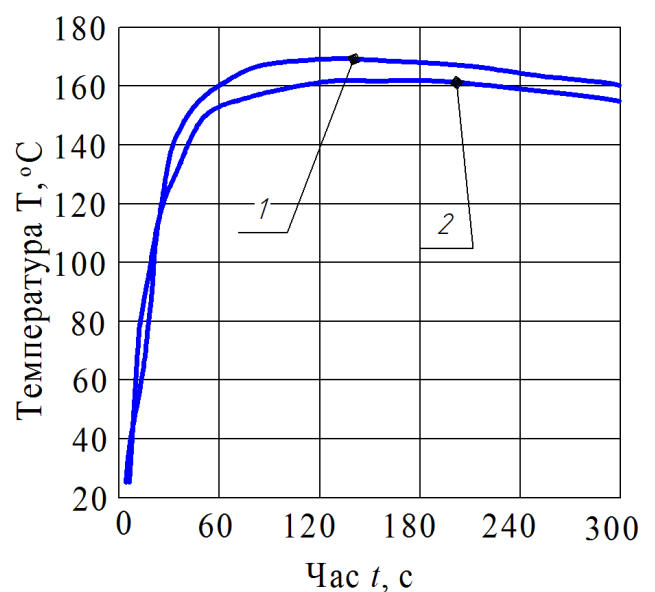
Рисунок 3.3 – Експериментальні (1) та розрахункові зі знайденим значенням коефіцієнта теплопередачі (2) температурні поля при заливанні сплаву А1-3Si у формі із сталі 20: а) – термопара Т1; б) – термопара Т2; в) – термопара Т3; г) – термопара Т4; д) – термопара Т5

На графіках спостерігаються невеликі розбіжності (до 15 °С) між експериментальними і розрахунковими кривими, отриманими при використанні залежності коефіцієнта теплопередачі від температури, представлені на малюнку 3.3 для термопар Т1-Т4 на протязі всього інтервалу запису температури. Розмежування між експериментальними і розрахунковими температурами в щілині для термопар Т5, яка розташована в розплаві, також не перевищує 15 °С.

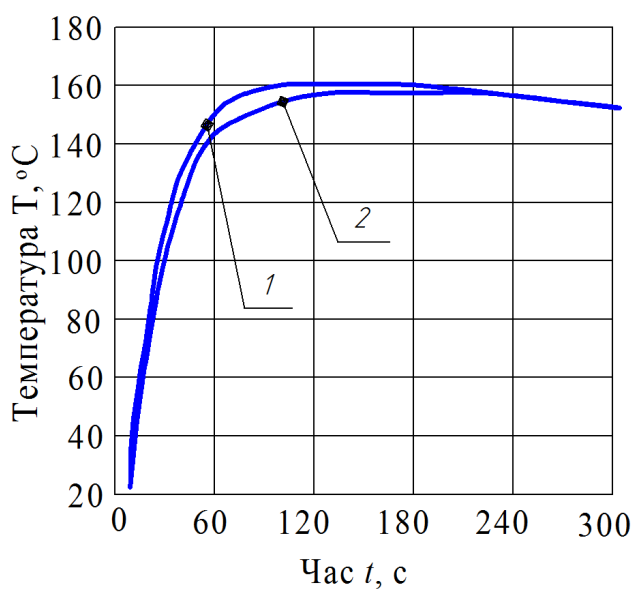
На рисунку 3.4 представлені розподіл температурних полів у виливку та формі для термопар Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, для випадку заливки сплаву А1-7Si.



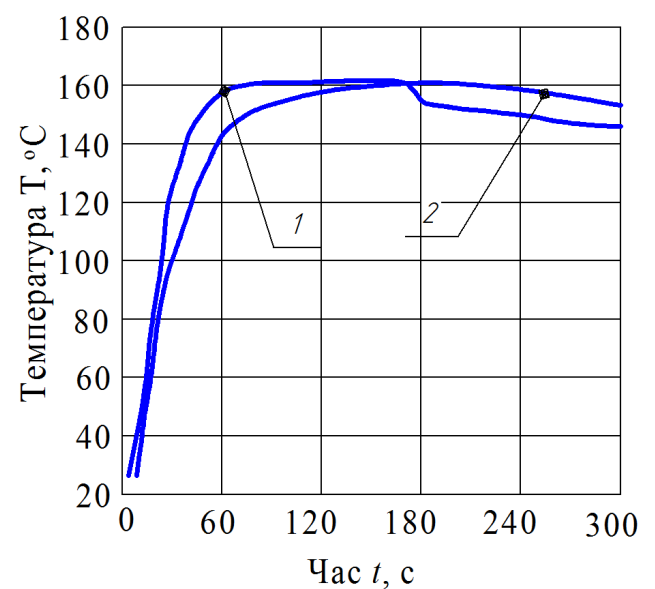
а)



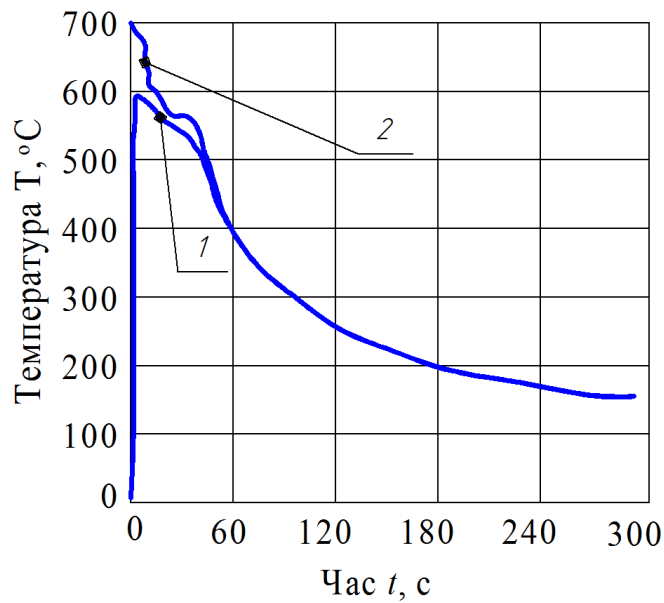
б)



в)



г)



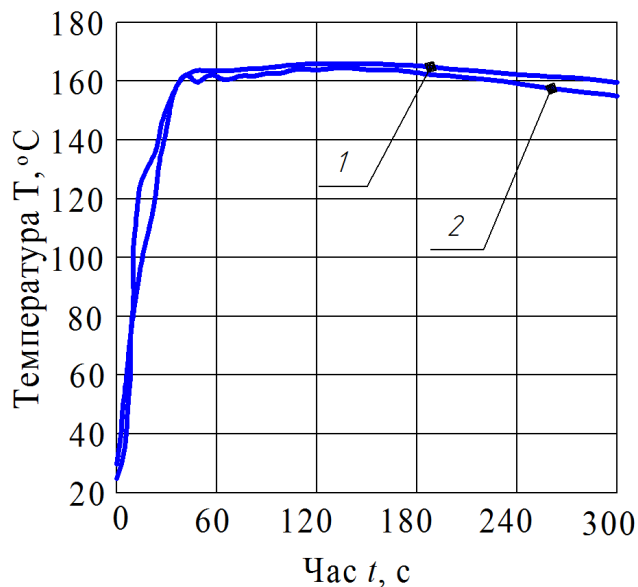
д)

Рисунок 3.4 – Експериментальні (1) та розрахункові зі знайденим значенням коефіцієнта теплопередачі (2) температурні поля сплаву А1-7Si при заливанні у форму із сталі 20: а) – термопара Т1; б) – термопара Т2; в) – термопара Т3; г) – термопара Т4; д) – термопара Т5

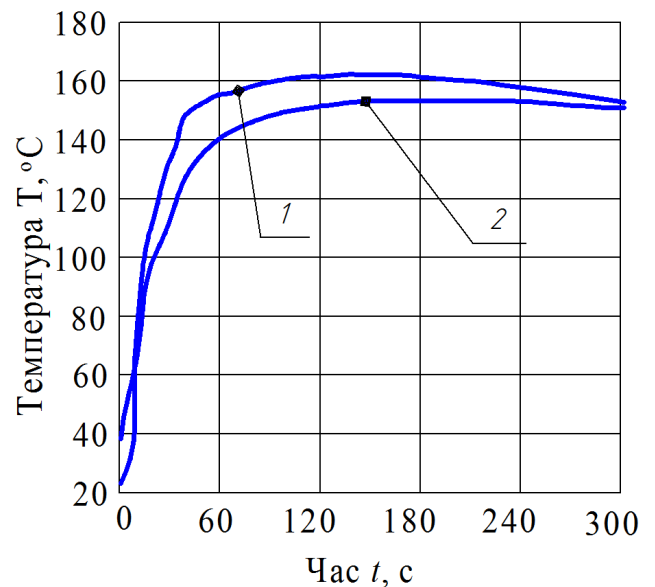
Розрахункові (для використання температурної залежності коефіцієнта теплопередачі) і експериментальні температурні поля добре відповідають більшості термопар. Однак найбільше розходження між розрахунковими і експериментальними температурами спостерігалось для термопари Т1, яка знаходилася в 2 мм від границі розділу щілини і форми. Різниця між змодельованими та експериментальними температурами для цієї термопари досягала 25 $^{\circ}\text{C}$. Для експериментальної кривої для термопари Т4 був виявлений значний спад на 5 $^{\circ}\text{C}$ на 180-й секунді, який міг бути визваний розміщенням термопари у відверсті при нагріванні форми та деформації клею, фіксуючого термопару. На графіках видно, що на всьому тимчасовому інтервалі для термопар Т2-Т4 спостерігалися незначні розпади (до 15 $^{\circ}\text{C}$) між експериментальними і розрахунковими температурами. Максимальний розходження між експериментальними і розрахунковими температурами у

відливі для термопар Т5, розташованої в розплаві (рисунок 3.4, термопара Т5), не перевищувало 23 °С у початковий момент часу.

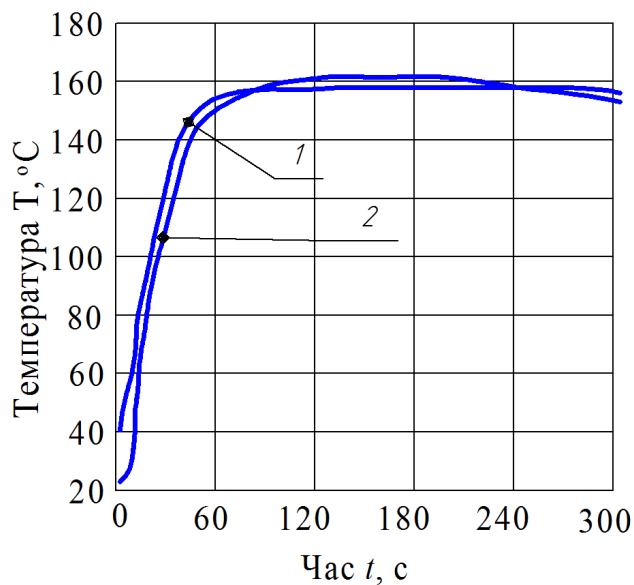
На рисунку 3.5 показані експериментальні та розрахункові (з використанням результатів температурної залежності коефіцієнта теплопередачі рис. 3.2) температурні поля, у злитку та формі для термопар Т1-Т5 для випадку заливки сплаву А1-12Si.



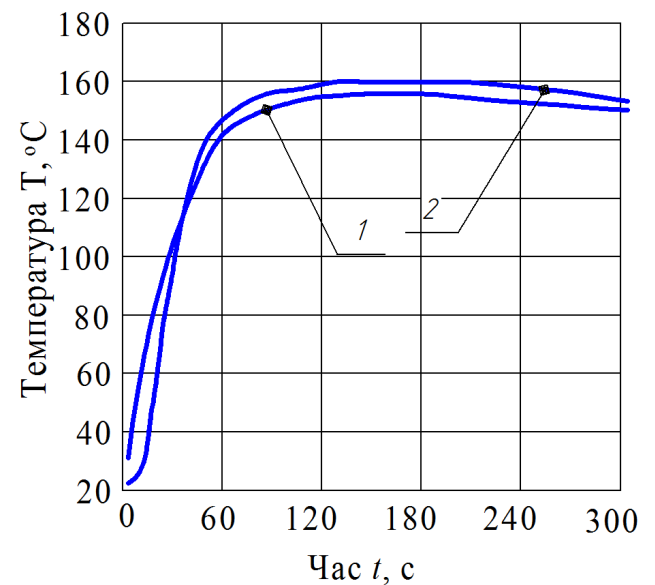
а)



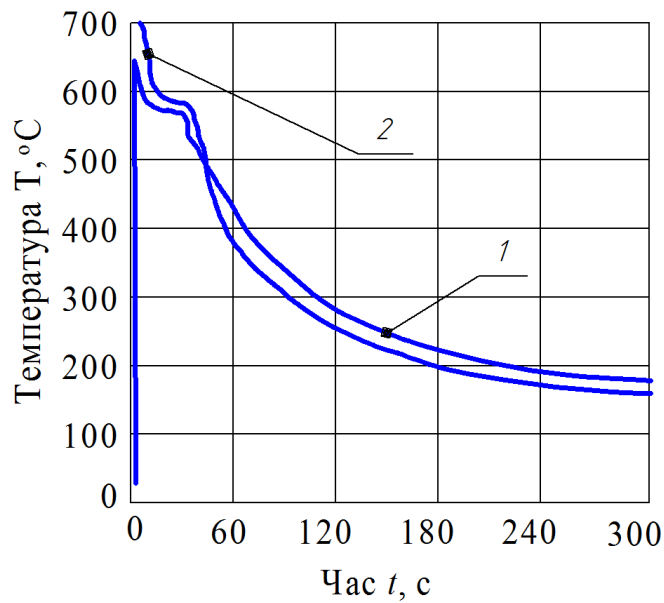
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.5 – Експериментальні (1) та розрахункові зі знайденим значенням коефіцієнта теплопередачі (2) температурні поля сплаву Al-12Si при заливанні у форму із сталі 20: а) – термопара Т1; б) – термопара Т2; в) – термопара Т3; г) – термопара Т4; д) – термопара Т5

З графіків рисунків 3.5 можна бачити, що для всіх термопар, встановлених у формі Т1-Т4, на всьому інтервалі часу є незначні розбіжності (до 10 °C) між експериментальними та розрахунковими температурами. Слід зазначити, що для термопари Т5 розташованої в розплаві (рис 3.5, Т5), різниця між експериментальною та розрахунковою температурами у виливку досягає до 30 °C. Тому, для отримання достовірного розподілу температур, особливо для виливка, слід експериментально визначати залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливки

3.3 Результати визначення коефіцієнта теплопередачі при заливанні сплаву МЛ5 у форму із сталі 20

На рисунку 3.6 представлений графік залежності коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні вилівка при заливанні магнієвого сплаву МЛ5 в металеву форму зі сталі 20.

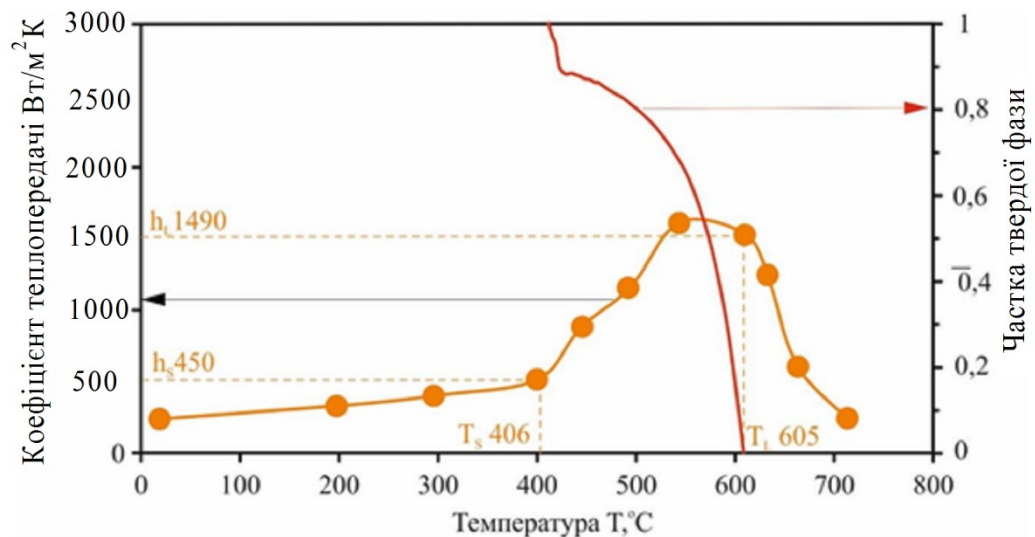
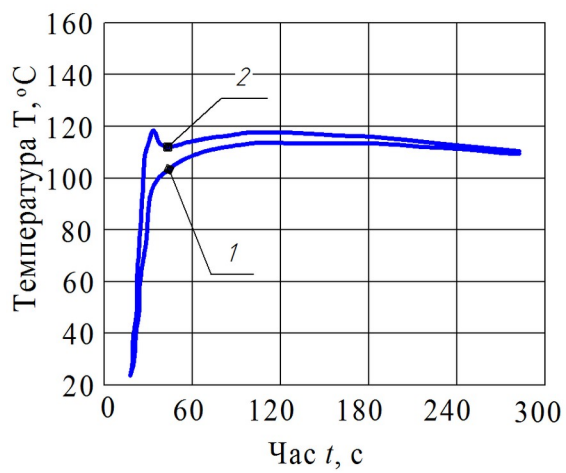


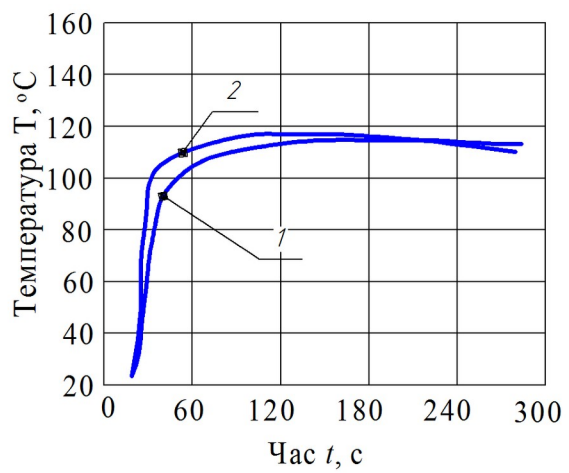
Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта теплопередачі і частки твердої фази від температури поверхні вилівка при заливанні сплаву МЛ5 в металеву форму зі сталі 20

З графіка видно, що від температури заливання сплаву МЛ5 (720 °C) до температури поверхні вилівка 543 °C, значення коефіцієнта теплопередачі досягає значення 1600 Вт/(м² К). При температурі рідини сплаву (605 °C) значення коефіцієнта теплопередачі становить 1490 Вт/(м² К). Від температури поверхні вилівка 543 °C значення коефіцієнта теплопередачі значно падає до температури солідуса сплаву 406 °C і становить 450 Вт/(м² К), від температури солідуса сплаву до кімнатної температури значення коефіцієнта теплопередачі плавно зменшується з 450 Вт/(м² К) до 240 Вт/(м² К).

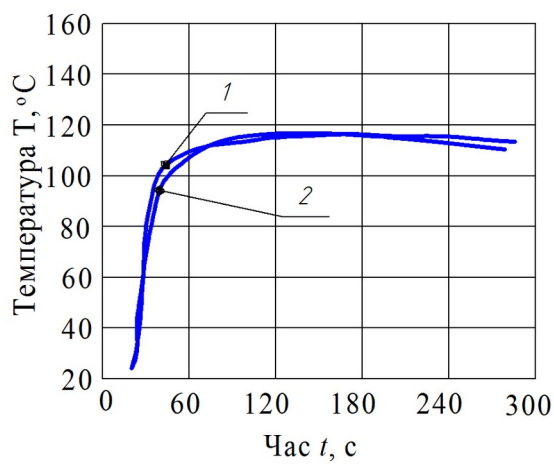
На рисунку 3.7 показані експериментальні та розрахункові (з використанням результатів температурної залежності коефіцієнта теплопередачі рис. 3.6) температурні поля, у злитку та формі для термопар Т1-Т5 для випадку заливки сплаву МЛ5.



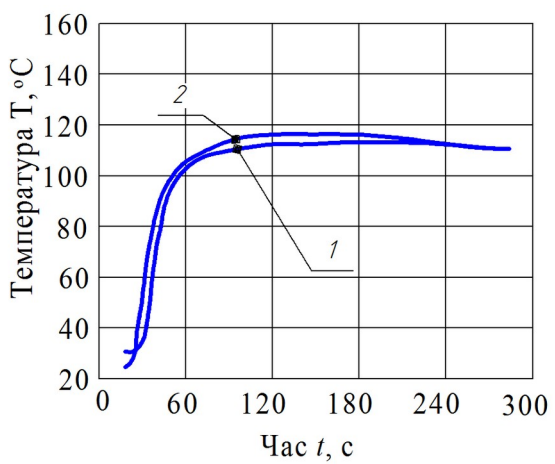
а)



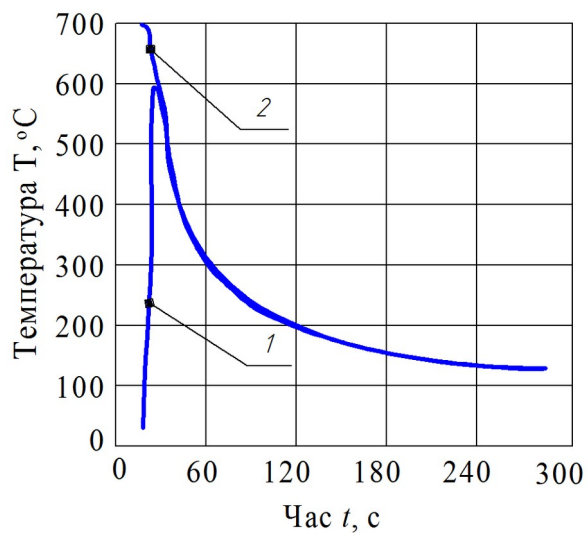
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.7 – Експериментальні (1) та розрахункові зі знайденим значенням коефіцієнта теплопередачі (2) температурні поля сплаву МЛІ5 при заливанні у форму із сталі 20: а) – термопара Т1; б) – термопара Т2; в) – термопара Т3; г) – термопара Т4; д) – термопара Т5

Як видно на графіках рис. 3.7 для термопар Т2-Т4 максимальне відхилення між розрахунковими та експериментальними температурними залежностями від часу становить до 5 °С на всьому проміжку часу для термопар Т5. Найбільше відхилення до 30 °С в інтервалі часу 0...50 секунд спостерігається для термопар Т1, встановленої на 2 мм від межі поділу виливок - форми. Для термопар Т5 спостерігається хороше співвідношення між експериментальними і розрахунковими температурними кривими від часу, розбіжність між експериментальними і розрахунковими температурами для термопар Т5 не перевищила 11 °С.

Таким чином, для графіка зміни коефіцієнта теплопередачі між виливками із сплаву МЛ5 і сталевою формою спостерігаються ті ж закономірності, що і для виливків із сплаву А1-Si. Зокрема, максимальне значення коефіцієнта теплопередачі спостерігається при температурі, близької до температури ліквідусу сплаву. Найбільш значну зміну коефіцієнта теплопередачі можна спостерігати в інтервалі кристалізації сплаву. А після повного затвердіння вилівка, коефіцієнт теплопередачі змінюється менш помітно.

3.4 Аналіз температурних залежностей при заливанні ливарних алюмінієвих сплавів системи А1-Si в кокіль.

Криві залежності температури від часу для всіх термопар в ливарній формі були дуже схожі для виливка з кожного сплаву. Після заливання сплаву, температура збільшувалася до максимального значення, а потім повільно знижувалася. Максимальні температури, отримані експериментально і при моделюванні для кожної термопарі із сплавів А1-3Si, А1-7Si, А1-12Si, МЛ5, відлитих у сталеву форму, показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних та розрахункових максимальних температурних полів від часу при заливанні розплавів Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si і МЛІ5 в кокіль

Номер термопар	Розплав							
	МЛІ5		Al-3Si		Al-7Si		Al-12Si	
	експ., °C	розрах., °C	експ., °C	розрах., °C	експ., °C	розрах., °C	експ., °C	розрах., °C
T1	114	117	143	154	150	161	164	163
T2	115	117	142	152	167	160	162	152
T3	116	116	145	152	161	159	160	161
T4	113	116	144	151	160	159	155	160

З таблиці 3.1 можна бачити, що для всіх сплавів розраховані та експериментальні максимальні температури досить близькі і відрізняються не більше ніж на 10 °C, що говорить про правильно підібраний вид кривої зміни коефіцієнта теплопередачі від температури. Що ж стосується самих максимальних значень температури, то для сплавів Al-Si максимальні температури на розрахованих і експериментальних кривих мало відрізняються. Але можна бачити, що для сплаву Al-7Si і Al-12Si температура вище, ніж для сплаву Al-3Si. Можна це пов'язано з тим, що зі збільшенням вмісту кремнію в сплаві збільшується значення прихованої теплоти кристалізації.

Середні значення експериментальних максимальних температур виливків із сплаву Al-7Si і сплаву МЛІ5, відлитих у сталеву форму, відрізнялися (160°C проти 115°C для сплаву Al-7Si і МЛІ5 відповідно). Крива охолодження (T5) для сплаву Al-7Si також відрізнялася від такої для сплаву МЛІ5, це пов'язано з тим, що виливок зі сплаву МЛІ5 охолоджується швидше, при цьому теплота кристалізації була меншою, тому цей ефект виділення теплоти кристалізації не проявився на температурній кривій і не був зафіксований.

Для сплаву Al-7Si зафіксовано чітку площадку, пов'язану з кристалізацією сплаву (рис. 3.4). Теплоти кристалізації сплавів Al-7Si і МЛІ5 близькі (389 Дж/г і 373 Дж/г відповідно). Однак їх щільність при кімнатній

температурі становить $2,69 \text{ г/см}^3$ і $1,81 \text{ г/см}^3$ відповідно. Це значить, що прихована теплота кристалізації, що виділяється при затвердінні 1 см^3 сплавів Al-7Si і МЛ5, становить 1046 Дж і 674 Дж відповідно. Таким чином, основною причиною різниці між кривими залежностями температури від часу для двох сплавів є різниця у виділенні прихованої теплоти кристалізації.

Висновки по третьому розділу

1. Проведено визначення температурної залежності коефіцієнта теплопередачі для сплавів Al-Si (Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si) та магнієвого сплаву МЛ5 при заливанні в металеву форму зі сталі 20. Залежність характеризується максимальними значеннями коефіцієнта поблизу температури ліквідусу, після чого коефіцієнт поступово знижується через формування зазору між виливком і формою.

2. Для сплавів системи Al-Si максимальне значення коефіцієнта теплопередачі залежало від складу сплаву. Зокрема, для Al-3Si коефіцієнт досягав $2600 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, тоді як для Al-12Si це значення становило $2500 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ при температурах, близьких до ліквідусу. Мінімальні значення коефіцієнта теплопередачі після завершення кристалізації були однаковими для всіх сплавів і складали близько $200 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

3. Для сплаву МЛ5 встановлено аналогічну залежність коефіцієнта теплопередачі від температури. Максимальне значення коефіцієнта становило $1600 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ поблизу температури ліквідусу. У процесі кристалізації коефіцієнт суттєво зменшувався до $450 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, а після завершення кристалізації плавно знижувався до $240 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

4. Максимальна розбіжність між експериментальними й розрахунковими значеннями температури у виливках становила до $30 \text{ }^\circ\text{C}$ для термопари, розташованої в зоні контакту виливка з формою. Для більшості термопар відхилення було меншим за $15 \text{ }^\circ\text{C}$, що свідчить про високу точність використаного підходу до моделювання коефіцієнта теплопередачі.

5. Установлено, що зі збільшенням вмісту кремнію в сплавах Al-Si збільшується прихована теплота кристалізації, що впливає на характер температурних кривих. Сплав МЛ5 охолоджується швидше через меншу приховану теплоту кристалізації та нижчу густину, що зменшує тривалість теплових процесів.

6. Отримані результати дозволяють точно моделювати процес теплопередачі в системі “виливок – металева форма”. Це сприяє оптимізації технологічних параметрів лиття й покращенню якості виливків завдяки точному прогнозуванню процесів кристалізації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Величина коефіцієнта теплопередачі залежить від багатьох параметрів, таких як температура поверхні виливка, теплофізичних властивостей матеріалів виливка і форми, тиску, величини зазору, що з'являється при усадці виливка і тепловим розширенням форми, шорсткістю поверхні форми та атмосферу в зазорі виливок-форма, товщину і склад фарб і покриттів.

2. Значення коефіцієнта теплопередачі між виливкою та ливарною формою сильно залежить від реалізованої технології лиття і використовуваних матеріалів, і його величина в значній мірі змінюється в процесі затвердження.

3. Для визначення величини коефіцієнта теплопередачі існують різні методики. Інверсійний метод є більш точним і надійним, ніж метод хронометрування, оскільки дозволяє враховувати більш складні умови охолодження і геометрію виливка і форми. Для визначення коефіцієнта теплопередачі між виливкою і формою часто використовується метод проб і помилок (trialanderror). Але основним критерієм, який дозволяє оцінити, наскільки експериментальні результати відрізняються від розрахованих, є функція помилок *Err*.

4. Для визначення коефіцієнта теплопередачі були вибрані широко відомі сплави на основі системи Al-Si з різним інтервалом кристалізації, що використовуються в ливарному виробництві, а також сплав МЛ5. Матеріал для виготовлення форми був обраний сталь.

5. В сучасних умовах точні знання теплофізичних властивостей матеріалів форм та ливарних сплавів, а також значення коефіцієнта теплопередачі на межі поділу метал-форма дають широкі можливості для моделювання ливарних процесів. Однак, точне вирахування коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою є складною задачею, і як правило його визначають експериментальним шляхом, але в сучасних умовах поширена тенденція на процес комп'ютерного моделювання, що дозволяє значно поліпшити прогнозування дефектів у виливках.

6. Для визначення коефіцієнта теплопередачі було обрано метод мінімізації функції помилок, що ґрунтується на порівнянні експериментальних та розрахункових значень температур у процесі заливання, затвердіння та

охолодження виливки та форми. Для визначення коефіцієнта теплопередачі було вибрано широко відомі сплави на основі системи Al-Si з різним інтервалом кристалізації, а також сплав МЛ5

7. Запропонувати лабораторну установку для дослідження процесу теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем.

8. Розробити методику визначення значення коефіцієнта теплопередачі між ливарними алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si та МЛ5і кокілем. 3. Вибрати основні методи дослідження хімічного складу ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Si.

9. Для визначення значення коефіцієнта теплопередачі були розміщені термопар безпосередньо на границі контакту металу з формою (T_1 , T_2) – мінімальне значення функції помилок для них було отримано за значення коефіцієнта теплопередачі h_L рівному $900 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ і h_S дорівнює $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$

10. Виявлено, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі $2600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ при температурі 658°C досягається при температурі вище, ніж температура ліквідусу сплаву для всіх сплавів, крім сплаву Al-12Si. Для даного сплаву максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі нижче солідусу.

11. При температурах солідусу 576°C , 552°C , 576°C для трьох сплавів - Al-3Si, Al-7Si і Al-12Si - значення коефіцієнта теплопередачі склали відповідно $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, $550 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ і $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, зі збільшенням частки твердої фази в сплаві відбувається значне зниження коефіцієнта теплопередачі. Максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається поблизу температури ліквідусу сплаву.

12. Графік зміни коефіцієнта теплопередачі між виливком із сплаву МЛ5 і кокілем зі сталі 20 показує максимальне значення коефіцієнта теплопередачі при температурі, близької до температури ліквідусу сплаву. Найбільш значну зміну коефіцієнта теплопередачі можна спостерігати в інтервалі кристалізації сплаву. А після повного затвердіння виливка, коефіцієнт теплопередачі змінюється менш помітно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Москалев І. Н. Ливарні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. – К.: НМКВО, 1993. – 368с.
2. Сабірзянов Т.Г. Теплотехніка ливарних процесів / Т.Г. Сабірзянов, В.М. Кропівний. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 402 с.
3. Griffith W.M, Sanders R.E.J., Halderman G.J. High-Strength PM Aluminum Alloys, 1982, p. 209.
4. Nath J. Aluminum Castings Engineering Guide : USA: ASM International, 2018. – 316 p
5. Лабай, В. Й. Тепломасообмін [Текст] : підручник для ВНЗ/ В. Й. Лабай. – Львів : Тріада Плюс, 2004. – 260 с.
6. Димо, Б. В. Теплофізичні основи суднової енергетики [Текст] : навч. посібник / Б. В. Димо, В. В. Кузнецов, О. А. Єпіфанов. – Миколаїв : НУК, 2019. – 120 с.
7. Співак, О. Ю. Тепломасообмін. Частина I [Текст] : навч. посібник / О. Ю. Співак, Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 113 с.
8. Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar. Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, Fifth edition. – New York, McGraw-Hill Education, 2015. – 991 p.
9. Погорєлов, А. І. Тепломасообмін (основи теорії та розрахунку) [Текст] : навч. посібник для ВУЗів. 4-те видання, виправлене / А. І. Погорєлов. – Львів : «Новий світ – 2000», 2006. – 144 с.
10. Константинов, С. М. Тепломасообмін [Текст] : підручник / С. М. Константинов. – К. : ВПІ ВПК «Політехніка»: Інрес, 2005. – 304 с.
11. Приходько, М. А. Термодинаміка та теплопередача [Текст] : навч. посібник / М. А. Приходько, Г. Г. Герасімов. – Рівне : НУВГП, 2008. – 250 с
12. Омельченко, О. В. Тепломасообмін [Текст] : навч. посібник / О. В. Омельченко, Л. О. Цвіркун. – Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021. – 100 с.

13. Герасимов, Г. Г. Теоретичні основи теплотехніки [Текст] : навч. посібник / Г. Г. Герасимов. – Рівне : НУВГП, 2011. – 382 с
14. Драганов Б. Х. Теплотехніка: підручник / Драганов Б. Х., Бессараб О. С., Долінський А. А., Лазоренко В. О., Міщенко А. В., Шеліманова О. В.; за ред. Драганова Б. Х.; 2-е вид., перероб. і доп. – К.: ІНК ОС, 2005. - 400 с.
15. Константинов С. М. Теплообмін: Підручник / Константинов С. М. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2005. - 304 с.
16. Алюміній та сплави на його основі [Текст]: навч. посіб./ В.З. Куцова[та ін.] – Д.: НМетАУ, 2004. – 135 с.
17. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. [Текст]: - К.: Держстандарт України, 1995.– 49 с.
18. Taylor, J.A. TheeffectofIroninAl-SiCastingAlloys / J.A. Taylor // 35thAustralianFoundryInstituteNationalConference. - Adelaide, Australia, 2004. - P.148-157.
19. Wang D., Zhou C., Xu G. et.al. Heattransferbehavioroftopsidepouringtwin-rollcasting // JournalofMaterialsProcessingTechnology.- 2014.- Vol. 214.- P. 1275-1284.
20. Griffiths W., Kawai K. Theeffectofincreasedpressureoninterfacialheattransferinthealuminiumgravitydiecastingprocess // JournalofMaterialsScience.- 2010.- Vol. 45.- P. 2330-2339.
21. Sun Z., Hu H., Niu X. Determinationofheattransfercoefficientsbyextrapolationandnumericalinversemethodsin squeeze casting of magnesium alloy AM60 // JournalofMaterialsProcessingTechnology.- 2011.- Vol. 211.- P. 1432- 1440.
22. Nishida Y., Droste W., Engler S. TheAir-GapFormationProcessattheCasting-MoldInterfaceandtheHeatTransferMechanismthroughtheGap // MetallurgicalTransactions B.- 1986.- Vol. 17B.- P. 833-844.
22. Bouchard D., Leboeuf S., Nadeau J.P. et.al. Dynamicwettingandheattransferattheinitiationofaluminumsolidificationoncoppersu

Dynamic wetting and heat transfer at the initiation of aluminum solidification on copper substrates // Journal of Materials Science.- 2009.- Vol. 44. Is. 8.- P. 1923-1933.

23. K.N. Prabhu, K.M. Suresha. Effect of superheat, mold, and casting material on the metal/mold interfacial heat transfer during solidification in graphite lined permanent molds // J. Mater. Eng. Perform. 13, 619 (2004).

24. Palumbo G., Piglionico V., Piccininni A. et.al. Determination of interfacial heat transfer coefficients in sand mould casting process using an optimised inverse analysis // Applied Thermal Engineering.- 2015.- Vol. 78.- P. 682- 694. 118

25. Zhang L., Li L., Ju H. et.al. Inverse identification of interfacial heat transfer coefficient between the casting and metal mold using neural network // Energy Conversion and Management.- 2010.- Vol. 51.- P. 1898-1904.

26. K. Ho and R.D. Pehlke. Metal-Mold interfacial heat transfer // Metall. Trans. B, 1985, vol. 16B, pp. 585-94.

27. Ramesh K. Nayak & Suresh Sundarraj. Selection of Initial Mold-Metal Interface Heat Transfer Coefficient Values in Casting Simulations—a Sensitivity Analysis // Metallurgical and Materials Transactions B volume 41, pages 151–160 (2010).

28. H.S. Kim, I.S. Cho, J.S. Shin, S.M. Lee, B.M. Moon. Solidification parameters dependent on interfacial heat transfer coefficient between aluminum casting and copper mold // ISIJ Int., 45 (2005), pp. 192-198.

29. Baghani A., Davami P., Varahram N. et.al. Investigation on the Effect of Mold Constraints and Cooling Rate on Residual Stress During the Sand-Casting Process of 1086 Steel by Employing a Thermomechanical Model // Metallurgical and Materials Transactions B.- 2014.- Vol. 45.- P. 1157-1169.

30. M. Prates, H. Biloni. Variables affecting the nature of the chill zone // Metall. Trans., 3 (1972), pp. 1501-1510.

Vol. 54.- P. 196-203.

32. Bertelli F., Cheung N., Garcia A. Inwardsolidificationofcylinders:
Reversalinthegrowthrateandmicrostructureevolution //
AppliedThermalEngineering.- 2013.- Vol. 61.- P. 577-582.

33. Martorano M., Capocchi J. Heattransfercoefficientatthemetall-
mouldinterfaceintheunidirectionalsolidificationof Cu-8%Sn alloys //
InternationalJournalofHeatandMassTransfer.- 2000.- Vol. 43.- P. 2541-2552.

34. Griffiths W. A modeloftheinterfacialheat-
transfercoefficientduringunidirectionalsolidificationofanaluminumalloy //
MetallurgicalandMaterialsTransactions B.- 2000.- Vol. 31B. Is. 2.- P. 285-295. 119

35. Kulkarni S., Radhakrishna D. Effectofcasting/
mouldinterfacialheattransferduringsolidificationofaluminiumalloyscastin CO2-sand
mould // MaterialsScience-Poland.- 2011.- Vol. 29.- P. 135–142.

36. J.V. Beck.
Determinationofoptimumtransientexperimentsforthermalcontactconductance // Int.
J. HeatMassTrans., 12 (1969), pp. 21-33.

37. J.V. Beck.
Nonlinearestimationappliedtothenonlinearinverseheatconductionproblem // Int. J.
HeatMassTrans., 13 (1970), pp. 703-716.

38. E.N. Souza, N. Cheung, C.A. Santos, A. Garcia.
Factorsaffectingsolidificationthermalvariablesalongthecross-
sectionofhorizontalcylindricalingots // Mater. Sci. Eng. A, 397 (2005), pp. 239-
248.

39. Prabhu K.N., Griffiths W.D.
Assessmentofmetal/mouldinterfacialheattransferduringsolidificationofcastiron.
Mater. Sci. Forum. 2000. Vol. 329— 330. P. 455—460.

40. H.M. Sachin, K. Kocatepe, R. Kayikci, N. Akar.
Determinationofunidirectionalheattransfercoefficientsduringunsteadystatesolidifica-
tionatmetalcastingchillinterface // EnergyConvers. Manage., 47 (2006), pp. 19-34.

41. X. Xue, B.D. Zhou, K.L. Lin.

Numerical simulation of equivalent heat transfer coefficient between cast aluminum alloy ZL101 and furan resins sand mould // Mater. Sci. Technol., 9 (2001), pp. 206-210.

42. H.C. Sun, L.S. Chao. An investigation into effective heat transfer coefficient in the casting of aluminum in a green-sand mold // Mater. Trans., 50 (2009), pp. 1396-1403.

43. V. Paschakis. Heat Flow Problems in Foundry Work // AFA Transactions, 1944, vol. 52, pp. 649-70.

44. R.J. Sarjant and M. R. Slack. Internal temperature distribution in the cooling and reheating of steel ingots // J. Iron and Steel Inst., 1954, vol. 177, pp. 428-44.

45. Kang J., Hao X., Nie G. et.al. Intensified cooling of castings after solidification // Journal of Materials Processing Technology.- 2015.- Vol. 215.- P. 278–286. 120

46. Kubo K., Pehlke R. Mathematical modeling of porosity formation in solidification // Metallurgical Transactions B.- 1985.- Vol. 16.- P. 359–366.

47. Fardilkhchy A. Jabbari M. Davami P. Effect of pressure on heat transfer coefficient at the metal/mold interface of A356 aluminum alloy // International Communications in Heat and Mass Transfer 39 (2012) 705–712.

48. Y.Ali., D. Qiu., B. Jiang., F. Pan., Current research progressing grain refinement of cast magnesium alloys : A review article // Journal of Alloys and Compounds 2015. Vol. 619. P. 639-651.

49. K.Luo., L.Zhang., G.Wu., W.Liu., W.Ding. Effect of Y and Gd content on the microstructure and mechanical properties of Mg–Y–RE alloys // Journal of Magnesium and Alloys. 2019. Vol.7. Iss2. P.345-354.

50. M.Yeganeh., N.Mohammadi. Superhydrophobic surface of Mg alloys: A review // Journal of Magnesium and Alloys. 2018. Vol.6. Iss.1. P.59-70.

51. J. Du., Z. Lana., H. Zhang., S. Lü., H. Liu., J. Guo. Catalytic enhanced hydrogen storage properties of Mg-based alloy by the addition of reduced graphene oxide supported V_2O_3 nanocomposite // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 802. P. 660-667.

52. Song J., She J., Chen D., Pan F. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. // Journal of Magnesium and Alloys 2020. Vol. 8.

53. N.Mo., I.McCarroll., Q.Tan., A.Ceguerra., Y.Liu., and all. Understanding solid solution strengthening at elevated temperatures in a creep resistant Mg–Gd–Ca alloy // Acta Materialia. 2019. Vol.181. P.185-199.

54. D.Zhang., Q.Yang., B.Li., K.Guan., N.Wang. Improvement on both strength and ductility of ~~Zn~~ casting alloy via Yb addition // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol.805. P.811-821.