

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ
І ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Пояснювальна записка

до випускної магістерської роботи

зі спеціальності 136 – Металургія

за освітньо-професійною програмою – Ливарне виробництво чорних та
кольорових металів і сплавів

На тему: Удосконалення технології лиття кольорових металів на підставі
моделювання теплових процесів у ливарних формах

Виконав: магістрант групи ЛВ-23-1м _____ Попов Д.

Керівник випускної роботи _____ Саїтгареев Л.Н.

Нормоконтролер _____ Саїтгареев Л.Н.

Завідувач кафедри _____ Савельєв С.Г.

Кривий Ріг

2024р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи складається з ___ сторінок, ___ рисунків, ___ таблиць, ___ використаних джерел.

Магістерська робота на тему «Удосконалення технологій лиття кольорових металів на підставі моделювання теплових процесів у ливарних формах» присвячена визначенню коефіцієнта теплопередачі та його урахуванню в програмних комплексах для моделювання ливарних процесів

Метою роботи є підвищення адекватності моделювання шляхом знаходження коефіцієнтів теплопередачі для різних пар сплав-форма і пошук зв'язку між значенням коефіцієнта теплопередачі з параметрами кристалізації сплаву.

У першому розділі розповідається методи визначення коефіцієнта теплопередачі, методи розрахунку температурних полів у сучасних програмних комплексах з моделювання ливарних процесів

У другому описано методи та обладнання, які застосовуються при дослідженнях .

У третьому розділі наведено результати досліджень з визначення коефіцієнту теплопередачі між зливками із сплавів системи Al-Si та формами з металу, ХТС та графіту.

У четвертому розділі наведено результати розрахунку екномічної доцільності впровадження на виробництвах систем прогнозування параметрів лиття.

У п'ятому розділі розглянуто теплове випромінювання як небезпечних виробничий чинник.

Ключові слова: СИЛУМІН, КОКІЛЬ, ГРАФІТОВА ФОРМА, ХТС, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА МОДЕЛЮВАННЯ, ФУНКЦІЯ ПОМИЛОК.

ЗМІСТ

ВСТУП

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Коефіцієнт теплопередачі як чинник для оптимізації процесу лиття

1.2. Огляд методик визначення коефіцієнта

Висновки

1.3. Огляд сучасних систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМ ЛП)

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Сплави та методи їх приготування

2.2. Вибір матеріалів ливарних форм для дослідження

2.3. Підготовка форм до досліджень

2.3.1. Підготовка форми з ХТС

2.3.2. Підготовка графітової форми

2.3.3. Підготовка металевої форми

2.4. Методика отримання експериментальних температурних кривих

2.5. Методика визначення хімічного складу сплавів

2.6. Методика визначення коефіцієнтів теплопередачі для різних пар метал-форма

2.7. Методика визначення швидкості охолодження і часу затвердіння виливків різного діаметру

3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МІЖ ЗЛИВКАМИ З СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Si ТА ФОРМАМИ З МЕТАЛУ, ХТС ТА ГРАФІТУ

3.1. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання різних сплавів у форму з ХТС

3.2. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання різних сплавів у форму зі сталі Ст3.

3.3. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання різних сплавів у форму з графіту

3.3.1. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання чистого алюмінію марки А99 у форму з графіту

3.3.2. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі при заливці сплавів на основі Al-Si у форму з графіту

3.4. Порівняння залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні злитка для форм, що забезпечують різні швидкості охолодження

3.4.1. Порівняння знайдених залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури при заливці сплаву Al-3Si у форми зі сталі та графіту

3.4.2. Порівняння знайдених залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури під час заливання сплаву Al-7Si у форми з ХТС, сталі та графіту

3.4.3. Порівняння знайдених залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури під час заливання сплавів на основі Al-12Si у форми з різною швидкістю охолодження

4. ЕКОНОМІЧНА РЕЗУЛЬТАТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

5. ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

СПИСОК ВИКОРИСТОВУВАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Актуальність роботи.

Розвиток комп'ютерних технологій призвів до застосування математичного моделювання в різних галузях техніки і технології, зокрема і в ливарному виробництві. Широке поширення систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМ ЛП) значно спростило процес прогнозування можливих областей утворення ливарних дефектів. Однак адекватність результатів комп'ютерного моделювання, отриманих з використанням різних програмних продуктів, результатам, одержуваним під час лиття реальних виливків, не завжди однакова. Це пов'язано не тільки з адекватністю використовуваної математичної моделі, а й із врахованими під час розрахунку теплофізичними властивостями матеріалів і граничними умовами. Для отримання адекватних результатів математичного моделювання необхідне їхнє обов'язкове зіставлення з експериментом і подальше уточнення вихідних даних, що застосовуються в комп'ютерній моделі.

Для отримання достовірних результатів комп'ютерного моделювання крім теплофізичних властивостей матеріалів, потрібно визначити низку граничних умов. Однією з граничних умов є коефіцієнт теплопередачі між виливком і формою. Величина коефіцієнта теплопередачі не постійна і залежить від безлічі параметрів і з цієї причини її зазвичай визначають експериментально. У роботі буде розглянуто вплив складу сплаву і матеріалу форми на значення коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою.

Мета роботи.

Метою роботи є підвищення адекватності моделювання шляхом знаходження коефіцієнтів теплопередачі для різних пар сплав-форма і пошук зв'язку між значенням коефіцієнта теплопередачі з параметрами кристалізації сплаву.

Для досягнень поставленої мети вирішувалися такі завдання:

1. Отримати температурні поля у формах і криві охолодження в злитках, залитих у форми з ХТС, сталі і графіту.
2. З використанням методу мінімізації функції помилок, отримати залежності коефіцієнта теплопередачі від температури.
3. На основі аналізу температурних залежностей коефіцієнтів теплопередачі між алюмінієвими сплавами і формами зі сталі та графіту, встановити вплив інтервалу кристалізації сплаву на вигляд температурної залежності коефіцієнта теплопередачі.
4. Оцінити доцільність впровадження запропонованих рішень щодо підвищення адекватності розрахунків та проєктування технологій лиття.
5. Оцінити вплив найважливіших виробничих факторів, існуючих при даній технології лиття, на безпеку праці та екологічний стан.

Практична значущість.

1. Знайдено температурні залежності коефіцієнтів теплопередачі на межі злиток/форма під час заливання сплавів Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si і чистого

алюмінію А99 у форми з холоднотверднучої суміші, сталі та графіту в широкому діапазоні від температури заливки до виймання виливки з форми.

2. Знайдені значення коефіцієнта теплопередачі підвищують адекватність моделювання розподілу температур у виливку та формі, що, своєю чергою, дасть змогу достовірно прогнозувати утворення недоливів, усадочних дефектів і термічних напружень.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Коефіцієнт теплопередачі як чинник для оптимізації процесу лиття

Коефіцієнт теплопередачі - це один із важливих параметрів, який визначає ефективність передачі тепла між виливком і формою під час лиття металів. Цей коефіцієнт є ключовим фактором для оптимізації процесу лиття, оскільки він безпосередньо впливає на якість виливки. Коефіцієнт теплопередачі показує, яка кількість теплоти переходить за одиницю часу від більш нагрітого до менш нагрітого тіла через 1 м² поверхні за різниці температур між тілами в 1 градус.

Однак, точне обчислення коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою є складним завданням, і найчастіше його визначають експериментальним шляхом. Визначення коефіцієнта теплопередачі дає змогу провести процес комп'ютерного моделювання, поліпшити результати прогнозування дефектів у виливку.

Величина коефіцієнта теплопередачі залежить від багатьох параметрів, як-от температура поверхні виливки, теплофізичні властивості матеріалів виливки та форми, тиск (наприклад, під час лиття прокаткою і лиття під тиском), величина зазору, який з'являється під час усадки виливка і тепловому розширенні форми, шорсткість поверхні форми та атмосфера в зазорі виливок-форма. Значення має також товщина і склад використовуваних фарб і покриттів.

Коефіцієнт теплопередачі, як правило, не є постійною величиною і змінюється під час затвердіння виливка.

Під час затвердіння виливка утворюється тверда кірка, яка як тверде тіло піддається лінійній усадці. Таким чином у процесі охолодження відбувається формування повітряного зазору між виливком і формою. Значення коефіцієнта теплопередачі знижується по мірі зниження температури поверхні виливка і збільшення величини повітряного зазору.

Коли розплавлений метал вступає в контакт з охолоджуваною поверхнею форми, утворюється тонкий шар затверділого металу. Але на цій стадії теплопередача відбувається за рахунок теплопровідності через виступи на шорсткуватих поверхнях виливки і форми, які перебувають у контакті, а також за рахунок теплопровідності через повітря або інші гази, які перебувають у порожнинах між цими контактними майданчиками (рисунок 1.1).

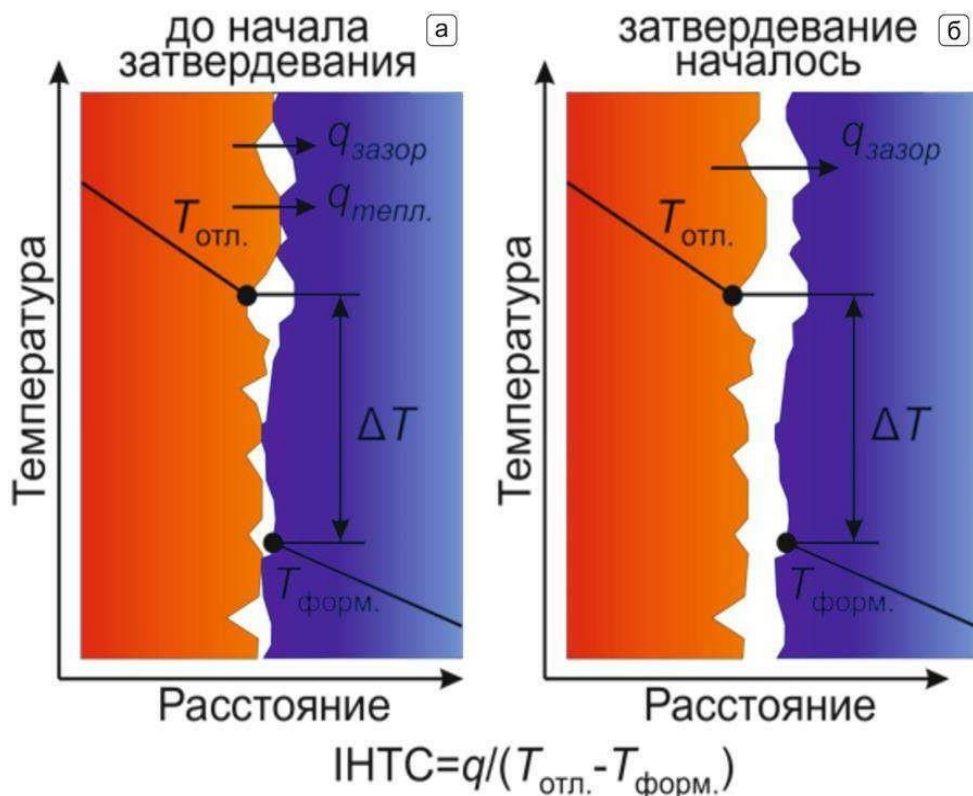


Рисунок 1.1 - Зміна коефіцієнта теплопередачі в міру затвердіння виливки а - до початку затвердіння виливки, б - у процесі затвердіння виливки: Де: q - кількість теплоти; $T_{вил}$ - температура виливки; $T_{форм}$ - температура форми

У міру затвердіння лінійне розширення металевої форми і лінійна усадка виливки змінює ступінь контакту і розмір зазору між поверхнями виливки і формою. У підсумку цей процес призводить до повної відсутності контакту між виливком і формою, і, як наслідок, різкого зниження коефіцієнта теплопередачі, адже тепло відводиться від виливка через відносно ізолювальний "повітряний зазор" за допомогою конвекції або випромінювання, якщо температура поверхні виливка значно перевищує $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. У вакуумі конвекція відсутня, тому в цьому випадку основним механізмом передачі тепла буде кондукція до моменту утворення твердої кірки на поверхні виливки.

Після початку затвердіння виливка і утворення зазору між ним і формою тепло під час вакуумної заливки передається тільки випромінюванням. Таким чином, коефіцієнт теплопередачі сильно залежить від реалізованої технології лиття і використовуваних матеріалів, і його величина значною мірою змінюється у процесі затвердіння.

1.2. Огляд методик визначення коефіцієнта теплопередачі

У роботі [1] описується метод хронометрування для визначення коефіцієнта теплопередачі, що полягає в порівнянні часу повного затвердіння виливка (за зникненням рідкої фази), отриманого експериментально, з розрахунковим часом затвердіння тієї самої виливки за різних значень коефіцієнта теплопередачі, отриманим за допомогою математичного моделювання. Цей метод є найпростішим для визначення коефіцієнта

теплопередачі, проте є складнощі при визначенні часового моменту закінчення затвердіння для сплавів, що мають широкий інтервал кристалізації.

Автори роботи отримали середнє значення коефіцієнта теплопередачі під час лиття алюмінієвих сплавів у піщано-глинисті форми, що дорівнює $500 \text{ Вт/м}^2\text{-К}$. Але використання постійного коефіцієнта теплопередачі для розрахунків, що тривають нижче за температуру солідуса сплаву (наприклад, при обчисленні напружень у виливку) є некоректним.

Найчастіше коефіцієнт теплопередачі визначають експериментально, вимірюючи температуру за допомогою термопар, що встановлюються у сплаві та формі, або шляхом вимірювання зазору між виливком і формою. Перший спосіб (запис температур) дає змогу знаходити зміну значення коефіцієнта теплопередачі від часу або від температури. Для моделювання найкраще підходить залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливки, оскільки вона може бути застосована для різних за конфігурацією виливків. Залежність же коефіцієнта теплопередачі від часу характерна тільки для тієї виливки, для якої вона була знайдена.

Для визначення величини коефіцієнта теплопередачі за експериментальними даними також використовують інверсійний метод. Інверсійний метод визначення коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою ґрунтується на аналізі температурних полів виливка в процесі затвердіння. Цей метод полягає в розв'язанні оберненої задачі теплопровідності, за якої значення температурних полів, отримані експериментальним шляхом, слугують для знаходження коефіцієнта теплопередачі.

Інверсійний метод є точнішим і надійнішим, ніж метод хронометрування, оскільки дає змогу враховувати складніші умови охолодження і геометрію виливки та форми.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою часто застосовується метод проб і помилок (trial and error). Це емпіричний метод, заснований на серії експериментів та аналізі їхніх результатів.

Суть методу полягає в проведенні серії розрахунків у СКМ ЛП, в яких підбираються значення коефіцієнта теплопередачі, і подальшому порівнянні експериментальних і розрахункових температурних полів.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі методом проб і помилок необхідно отримати експериментальні температурні поля у виливку і формі, а також знати початкову температуру виливка і форми та час затвердіння. Після серії розрахунків вибирається оптимальне значення коефіцієнта теплопередачі на основі порівняльного аналізу експериментальних і змодельованих температурних полів. Метод проб і помилок є одним із найпростіших і найдоступніших методів визначення коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою, але при цьому він має деякі обмеження, як-от необхідність проведення великої кількості експериментів і розрахунків, а також значна залежність одержуваних результатів від умов експерименту.

Основним критерієм, який дає змогу оцінити, наскільки експериментальні результати відрізняються від розрахункових, є функція помилок Err , описувана в загальному вигляді рівнянням (1) :

$$Err = \sum_{i=1}^n (t_p - t_{\text{э}})^2 \quad (1)$$

Де: Err -функція помилок,

t_p - розрахункова температура в кожній точці,

$t_{\text{э}}$ - експериментально визначена температура в кожній точці,

n - кількість вимірювань.

Чим менше значення Err , тим ближче порівнювані величини одна до одної (у разі визначення коефіцієнта теплопередачі це розраховані й експериментальні температурні поля у виливку і формі). У разі повного їхнього збігу значення функції помилок дорівнює нулю.

Прабху та ін. у роботі [2] визначали значення коефіцієнта теплопередачі від часу інверсійним методом для випадку затвердіння чавуну в піщано-глинистих формах. Середнє значення коефіцієнта теплопередачі становило $625 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Сачин та ін. [3] 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 односпрямованого затвердіння. Значення коефіцієнта теплопередачі між виливком зі сплаву Al-Si і мідним кокілем становило близько $19-9,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а між виливком і сталевим кокілем - $6,5-5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Сюе та ін. [4] розраховували еквівалентне значення коефіцієнта теплопередачі між алюмінієвим сплавом ZL101 (аналог АК7ч) і формою з холоднотверднучої суміші (ХТЗ) на фурановому зв'язуючому. У процесі лиття сплаву у форму з ХТС виявили, що внизу значення коефіцієнта теплопередачі становить від 50 до $300 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$, а вгорі - $50-150 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$. Було встановлено, що значення коефіцієнта теплопередачі змінюється залежно від площі поперечного перерізу виливка і зростає зі збільшенням площі поверхні розділу метал/форма.

Сан і Чао [5] досліджували зміну коефіцієнта теплопередачі на межі між циліндричним алюмінієвим виливом і піщано-глинистою формою. Було виявлено, він досягає свого максимального значення одразу ж після заливки через ідеальний контакт між металом і формою, а потім падає до мінімального значення, після чого знову піднімається в результаті випаровування вологи. Нарешті, значення коефіцієнту поступово зменшувалося внаслідок утворення повітряного зазору.

Термічний опір через повітряний зазор є важливою частиною опору тепловому потоку на межі розділу метал/форма, і вплив повітряного зазору на охолодження і затвердіння теоретично обговорювався багатьма дослідниками. Більшість дослідників робіт розглядали значення коефіцієнта теплопередачі як функцію часу. Однак важко застосувати розрахований коефіцієнт теплопередачі, що відповідає часу затвердіння, у реальних ситуаціях або в

комп'ютерному моделюванні. Наприклад, Кім та ін. [1] 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. У роботі [6] при моделюванні процесу лиття алюмінієвого сплаву у форму з ХТС при температурі 800°C значення коефіцієнту теплопередачі становило 200 Вт/м² -К при температурі вище ліквідусу та $h_s = 50$ Вт/м² -К за температури нижче солідусу. У роботі [30] також використовували низьке значення коефіцієнта теплопередачі для поверхні розділу алюмінієвий сплав - піщана форма (42 Вт/м² -К), але це значення приймалося постійним. Значно більше значення 1700-1800 Вт/м² -К у початковий момент часу, що відповідає температурі розплаву вище ліквідусу, і 400 Вт/м² -К за температури нижче солідуса було знайдено в роботі [7] під час лиття алюмінієвого сплаву в піщану форму, виготовлену за амін-процесом. Автори роботи [8] визначали початкове значення коефіцієнта теплопередачі під час лиття алюмінієвого сплаву в піщану форму й отримали значення 3000 Вт/м² К. Як видно, значення коефіцієнтів теплопередачі в зазначених вище роботах сильно різняться.

Дані про коефіцієнт теплопередачі між алюмінієвим сплавом і формою зі сталі описуються в роботах [8, 9]. У роботі [8] автори знаходили коефіцієнт теплопередачі під час заливання кубічного виливка зі сплаву Al13Si розміром 1x1x1 см³ у піщано-глинисті форми зі встановленими на дні холодильниками зі сталі та міді такого ж розміру. Коефіцієнт теплопередачі визначали шляхом порівняння експериментальних і розрахованих у СКМ ЛП ProCast кривих охолодження за різних початкових значень коефіцієнта теплопередачі (ІНТС). Початкові значення коефіцієнта задавали від 500 Вт/(м² К) до 5000 Вт/(м² К). Після порівняння розрахункових і змодельованих температурних кривих автори [8] визначили, що для піщано-глинистої форми значення коефіцієнта становить 3000 Вт/(м² К), для сталевого і мідного холодильника значення коефіцієнта становить 7000 Вт/(м² К).

Дані про коефіцієнт теплопередачі між алюмінієвим сплавом і формою з вуглецевої сталі з графітовим покриттям наведено в статті [9]. Експеримент проводився за допомогою металевої виливниці, з товщиною стінки 26 мм, діаметр форми 102 мм, товщина графітового покриття становила 100 мкм. Для виготовлення виливки використовували чистий алюміній 99,9%, температура заливки становила 760 °С. Максимальне значення коефіцієнта теплопередачі становило 760 Вт/м² -К з моменту заливки виливка і до температури 610 °С, нижче цієї температури значення коефіцієнта різко впало до 450 Вт/м² -К, після чого поступово знизилося до 100 Вт/м² -К при температурі 400 °С .

1.3. Огляд сучасних систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМ ЛП)

Широке поширення СКМ ЛП значно спростило процес прогнозування результатів застосування ливарної технології на практиці.

Велика кількість програм комп'ютерного моделювання призвела до того, що в 1999 р. за ініціативою Американської асоціації обчислювальної механіки було розпочато процес верифікації CAE-систем (V&V-процес).

Однак адекватність результатів комп'ютерного моделювання, отриманих з використанням різних програмних продуктів, результатам, одержуваним під час лиття реальних виливків, не завжди однакова. Це пов'язано не тільки з реалізованою в тій чи іншій програмі комп'ютерною моделлю, а й із врахованими під час розрахунку теплофізичними властивостями матеріалів і граничними умовами. Багатофакторність розв'язуваної задачі призводить до того, що для достовірності результатів комп'ютерного моделювання необхідне їхнє обов'язкове зіставлення з експериментом і подальше уточнення вихідних даних, що застосовуються в комп'ютерній моделі.

Сьогодні у світі налічується велика кількість програм для моделювання ливарних процесів. Істотним фактором для вітчизняних підприємств під час вибору програми для моделювання ливарних процесів залишається її вартість. У світовій практиці основного поширення набули програми, представлені в таблиці 1.1 .

Таблиця 1.1 - Програми для моделювання ливарних процесів.

Країна-розробник	Програма	Країна розробник	Програма
Німеччина	Magmasoft	США	Flow3D
Німеччина	WinCast	США	PowerCast
Франція	PROCast	США	SolidCast (AFSolid)
Франція	QuikCast	США	CAPCast
Франція	PAM-Cast	США	RAPID/CAST
Франція	CalcoSoft	Корея	AnyCasting
Іспанія	Вулкан	Фінляндія	CastCAE
Японія	JSCAST	Росія, м. Іжевськ	LVMFlow
Росія, м. Санкт-Петербург	Полігон ("ПолігонСофт")	Росія, г. Москва	FlowVision
Англія	Mavis-Flow	Індія	AutoCast
Китай	InteCast	Австралія	Castflow Castherm

СКМ ЛП у загальному випадку не призначені для генерації технологічних параметрів. Їхнє призначення - показати, до чого призведе використання заданих технологічних параметрів. Іншими словами, показати перебіг процесів, від яких залежить поява дефектів, процес утворення самих дефектів, їхнє розташування, характер тощо. Варіюючи ці параметри

(геометричні, технологічні, фізичні), можна підібрати таке їхнє поєднання, яке забезпечить стійку, бездефектну й економічно вигідну технологію .

Під час моделювання ливарних процесів найчастіше використовують такі методи числового розв'язання: метод скінченних елементів (МСЕ), метод скінченних різниць (МКР) і метод скінченних об'ємів (СКО). Два найпоширеніші чисельні методи в СКМ ЛП - це МСЕ і МКР. Найбільш наочно різницю між МСЕ і МКР видно за способом дискретизації геометрії, що продемонстровано на рис. 1.2. МКР більш старий метод, саме з ним пов'язані перші успіхи чисельного моделювання.

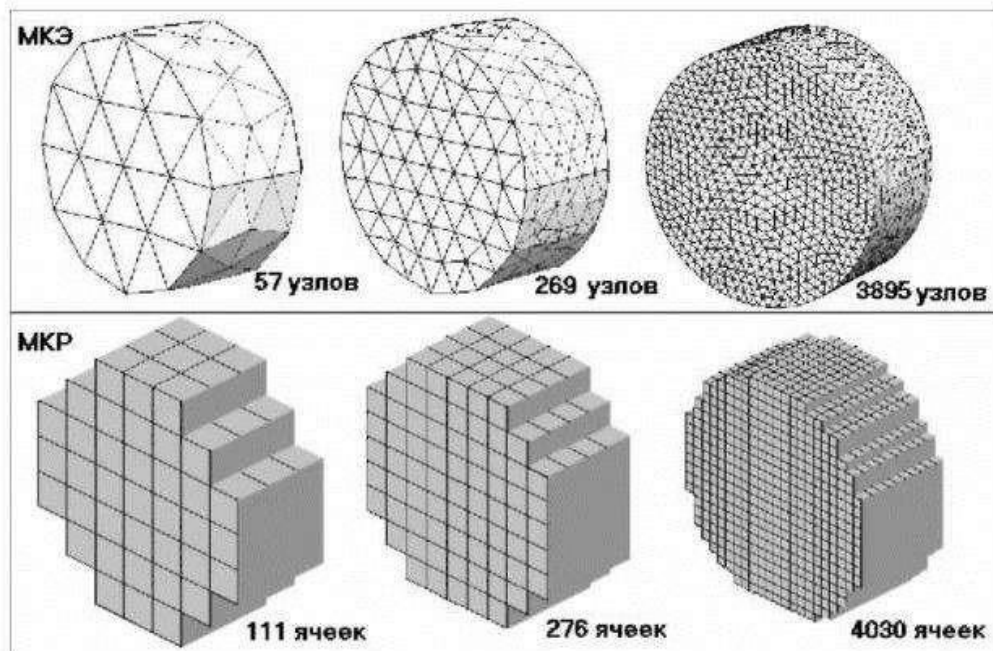


Рисунок 1.2 - Розрахункова сітка для моделювання виливки типу циліндр: МСЕ вгорі та МКР внизу за близьких значень густоти сітки .

Рівняння МКР зазвичай формулюють як перетворення рівняння нестационарної теплопровідності (і аналогічних еліптичних диференціальних рівнянь теорії поля) за допомогою рядів Тейлора або прямою заміною похідних різницевиими аналогами. Виходячи з розбивки у вигляді "цеглинок", у МКР при будь-якому ступені дискретності буде порушено співвідношення "об'єм/площа". У МКР можливі різні схеми розташування вузлів, у яких визначається шукана функція (наприклад, температура) усередині різницевої комірки. З погляду адекватнішого врахування граничних температур слід розташовувати вузли по вершинах різницевої "цеглинка". Однак у більшості різницевих СКМ ЛП вузол розташовують у центрі комірки для полегшення розв'язання, що призводить до додаткових похибок .

Метод скінченних об'ємів (МКО) у певному сенсі є розвитком різницевих методів. Від МКР він відрізняється тим, що в граничних різницевих комірках урахуються довільно орієнтовані межі, що "відсікають" від комірки довільний об'єм . Скінченно-елементний підхід молодший, більш

математизований, тобто на рівні вихідних посилок точніше відповідає рівнянням задач теорії поля. Сітка МКЕ найчастіше являє собою набір тетраедальних пірамід (див. Рис. 1.2), що дає змогу принципово точніше, ніж у МКЕ, описувати геометрію і не призводить до порушення співвідношення "об'єм/площа". Розрахункові вузли в МСЕ завжди розташовані на реальній поверхні, що дає змогу адекватно враховувати граничні потоки, наприклад, у разі наявності стрибка шуканої функції на межі "виливка-форма". Однак головна відмінність МКЕ в тому, що в ньому на рівні вихідних посилок припускається розподіл шуканої функції (температур, ентальпій тощо) в об'ємі елемента - найчастіше лінійний. Відповідно МКЕ потребує менше машинних ресурсів (менше оперативної пам'яті), розрахунок іде швидше (менші витрати процесорного часу), результат розрахунків може бути більш адекватним.

Метод скінченних різниць (МКР), що використовується в таких програмах, як "Magmasoft", "SolidCast", "CastCAE", "JSCAST", "AnyCasting" та інших, дає змогу в найкоротший термін отримати розподіл усадкових дефектів у проєктованому виливку і вчасно виправити технологію лиття. Однак для усунення усадочної пористості у виливках відповідального призначення такі програми не підходять, оскільки застосований математичний метод недостатньо добре працює в разі тонкостінних виливків, коли товщина стінок стає порівнянною з кроком сітки. Пов'язано це з тим, що розбиття вихідної геометричної моделі відбувається шляхом накладення прямокутної сітки з постійним кроком, що призводить до різкого збільшення числа розрахункових осередків у разі отримання тонкостінних виливків великих габаритних розмірів.

Метод скінченних елементів (МКЕ), який використовується в таких програмах, як "Poligon", "WinCast" тощо, дає змогу максимально врахувати геометрію виливки і виявити навіть незначні дефекти. Вбудовані генератори сіткової моделі в самих програмах дають великі похибки. Проблема розв'язується шляхом використання зовнішнього генератора сітки КЕ, що призводить до подорожчання придбаного програмного забезпечення, часу роботи, а також вимагає від персоналу високої кваліфікації.

Метод контрольних обсягів (МКО) (використовуваний у програмах "Flow-3D", "LVMFlow") поєднує в собі простоту і факторизацію МКР і хорошу апроксимацію меж між різними матеріалами і різними фазами. Це дає змогу проводити моделювання максимально швидко, не втрачаючи при цьому точності розрахунків. "LVMFlow" - єдина повноцінна програма для моделювання ливарних процесів, яка використовує цей метод. Програма "Flow-3D" також використовує МКО і є лідером для розрахунку гідродинамічних задач, проте не є від самого початку призначеною для процесів лиття, тому не так часто використовується для розв'язання досліджуваних задач.

З перерахованих програм ESI Group "ProCast" представляє великий набір додатків, модулів та інструментів для задоволення найсерйозніших виробничих потреб для ливарної промисловості. Система "ProCast", заснована на МСЕ, здатна, крім цього, прогнозувати виникнення деформацій і

залишкових напружень у виливку та може застосовуватися для аналізу таких процесів, як виготовлення стрижнів, відцентрове лиття, лиття за випалюваними моделями, безперервне лиття. "ProCast" постачається з 3D генератором тетрагональної сітки та засобом читання й аналізу геометрії з CAD систем. Розрахунок течії описується повним рівнянням Нав'є-Стокса і може проводитися спільно з аналізом температури і напружень. Термічний вирішувач дає змогу розраховувати тепловий потік з урахуванням теплопровідності, конвекції та випромінювання. За допомогою ентальпії враховується тепловиділення, пов'язане зі зміною фазового складу під час кристалізації і в твердому стані. З програмою "ProCast" поставляється велика база даних матеріалів для ливарних моделей. Її зміст постійно поповнюється достовірними даними, перевіреними в умовах діючого виробництва. У "ProCast" включено унікальну термодинамічну базу даних, яка дає змогу користувачеві, ввівши хімічний склад сплаву, автоматично отримати температурні залежності властивостей, необхідних для проведення точного розрахунку ливарного процесу. "ProCast" також має низку функцій, які необхідні для визначення коефіцієнта теплопередачі, як-от: побудова температурних кривих для заданих точок (вузлів) у моделі, задання коефіцієнта теплопередачі у вигляді графіка залежності від часу або температури.

Висновки

Для моделювання ливарних процесів необхідно знати точні теплофізичні властивості матеріалів форм і сплавів, що заливаються, а також значення коефіцієнта теплопередачі на межі розділу метал-форма. Для визначення коефіцієнта теплопередачі було обрано метод мінімізації функції помилок, що ґрунтується на порівнянні експериментальних і розрахункових значень температур у процесі заливки, затвердіння й охолодження виливки та форми. Крім того, цей метод може успішно взаємодіяти з системами комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМ ЛП). Для визначення коефіцієнта теплопередачі були обрані широко відомі сплави на основі системи Al-Si з різним інтервалом кристалізації.

Вибір матеріалів для виготовлення форм (графіт, сталь і ХТС) був зумовлений різною швидкістю охолодження виливків, що реалізуються у формах із цих матеріалів. Графіт має найбільшу швидкість охолодження, тоді як форми з ХТС мають найменшу швидкість охолодження. Це дало змогу дослідити вплив швидкості охолодження на коефіцієнт теплопередачі.

Було обрано програмний комплекс моделювання ливарних процесів "ProCast" (ESI Group), який використовували для моделювання процесу заливки та затвердіння злитків і знаходження значення коефіцієнта теплопередачі.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Сплави та методи їх приготування

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. Їхній склад, структура, режими виготовлення, зокрема термомеханічної обробки, продовжують постійно вдосконалюватися відповідно до зростаючих вимог до виробів. За вмістом кремнію сплави поділяють на доевтектичні (<12% Si), евтектичні (Al-12Si), і заевтектичні (>12% Si).

Ливарні сплави цієї системи, які використовують нині, як правило, мають вузький інтервал кристалізації та хороші ливарні властивості - невелику ливарну усадку, високу рідинноплинність, малу схильність до утворення тріщин у разі утрудненої усадки. Основними структурними складовими подвійних доевтектичних сплавів алюмінію з кремнієм є первинні кристали твердого розчину кремнію в алюмінії та подвійна евтектика (Al)+(Si).

Однією з причин вибору сплавів на основі системи Al-Si для дослідження є їхня хороша вивченість і можливість з достатньою точністю обчислювати їхні теплофізичні властивості за допомогою термодинамічних баз, а також верифікувати обчислені властивості шляхом порівняння з наявними літературними даними.

У роботі були використані сплави на основі алюмінію з різним вмістом кремнію: Al-3% Si, Al-7% Si, Al-12% Si, і чистий алюміній марки А99 (ГОСТ 11069-2001). Для приготування сплаву Al-7Si використовували чушки готового сплаву АК7ч (ГОСТ 1583-93), вмісту Mg у сплаві значення не надали. Чистий алюміній брали чушкової марки А99. Для приготування сплаву Al-3% Si і Al-12% Si, як шихтові матеріали використовували алюміній марки А85 (ГОСТ 11069-74) і кремній марки Кр0 (ГОСТ 2169-69). Плавку проводили у високочастотній індукційній печі частотою 20 кГц у графіто-шамотному тиглі розміру 3М на 3 кг бронзи. Після повного розплавлення шихтових матеріалів здійснювали інтенсивне перемішування графітовою мішалкою, знімали шлак, і для видалення розчиненого водню, проводили рафінування гексахлоретаном (C₂Cl₆). Гексахлоретан вводили в розплав "дзвіночком" за температури 760 °С. Далі проводили витримку 10-15 хв і знімали шлак.

Температуру заливки контролювали хромель- алюмінієвою термопарою.

Приготований розплав розливали за температури 720 °С у сталеві виливниці. Отримані сплави використовувалися багаторазово для проведення експериментів. Після кожного експерименту сплави переплавляли. Хімічний склад сплаву контролювали після проведення серії експериментів.

2.2. Вибір матеріалів ливарних форм для дослідження

У цій роботі використовувалися форми з ХТС, сталі та графіту. З одного боку, вибір матеріалів був заснований на можливості забезпечити різну швидкість охолодження, щоб визначити, як вона впливає на коефіцієнт теплопередачі. Іншим визначальним параметром була можливість використання знайдених значень коефіцієнтів теплопередачі на практиці, для чого обирали матеріали, які застосовують нині.

Виготовлення стрижнів і форм із холоднотверднучих сумішей є перспективним. Форми з ХТС застосовуються в штучному, серійному і масовому виробництві та дуже поширені у фасонному литті. Нині виготовлення форм для сплавів із чорних металів із ПГС становить 44 %, із ХТС - 56 %. За останні два роки виготовлення форм із ХТС збільшилося на 8 %, а з 2010 по 2020 роки виробництво форм із ХТС збільшилося на 27 %.

Сталь є одним із матеріалів, зазвичай використовуваних для виготовлення коків і прес-форм для лиття під тиском. Проте, для поліпшення механічних властивостей виливків іноді необхідні матеріали форм, що сприяють збільшенню швидкості охолодження. Наприклад, графітові форми підходять для лиття злитків, які потім піддаються деформаційній обробці. Оскільки графіт має вищу теплопровідність, ніж сталь, графітові форми забезпечують вищу швидкість охолодження в процесі лиття. Виливки зі сплавів на основі титану, нікелю, міді, алюмінію та цинку виготовляють із використанням графітових форм. Найперспективнішим методом є лиття в постійну графітову форму, які виготовляють фрезеруванням графітового блоку на верстаті з ЧПК. Якщо міцність графітової форми недостатня, у постійних сталевих формах можна використовувати графітовий облицювальний шар. Використання графітових форм дає змогу виготовляти виливки з поліпшеними механічними властивостями (завдяки високій швидкості охолодження) і високою точністю розмірів, технологічна перевага використання графіту як матеріалу ливарної форми полягає в тому, що, на відміну від сталевих форм, графіт є твердим змащенням, тому не потрібно додатково наносити фарби або змазки.

2.3. Підготовка форм до досліджень

Для визначення коефіцієнта теплопередачі на межі розділу метал - форма необхідно отримати графіки зміни температури в різних точках (температурні поля) залежно від часу. У цій роботі для зняття експериментальних температурних полів використовували форми з ХТС, сталі та графіту. У форми встановлювали хромель-алюмелеві термопари на різній відстані від поверхні метал-форма, відстань і розташування термопар для кожної форми визначали окремо, виходячи з геометричних особливостей форми.

2.3.1. Підготовка форми з ХТС

Виготовляли циліндричний виливок висотою 150 мм і діаметром знизу 50 мм і зверху 56 мм. Для виготовлення форм використовували кварцовий пісок 2К₁ О₃ 02 ГОСТ (2138-91), фуранову смолу "Furtolit Q105", та затверджувач "Härter SR 85" (фірма "Furtenbach GmbH", Австрія). На 1 кг піску додавали 15 г смоли (1,5 %) і 6 г затверджувача (0,6 %). Формування здійснювали пошарово в 4 опоках. Після формування нижньої опоки встановлювали 4 термопари по роз'єму з другою опокою і так далі. Форму розміщували на плиті з алюмінієвого сплаву. Загальний вигляд зібраної форми представлений на рис. 2.1 в. Для запису температур використовували хромель-алюмінієві термопари, їх розташовували на трьох рівнях за висотою, схема розташування термопар представлена на рис. 2.1: нижній рівень - термопари Т1, Т2, Т3, Т4; середній рівень - Т5, Т6, Т7, Т8, верхній рівень - Т9, Т10, Т11, Т12. Термопари Т1, Т5 і Т9 перебували на поверхні зіткнення розплаву з формою. Відстань між рівнями по вертикалі становила 40 мм, а між термопарами одного рівня по горизонталі - 10 мм.

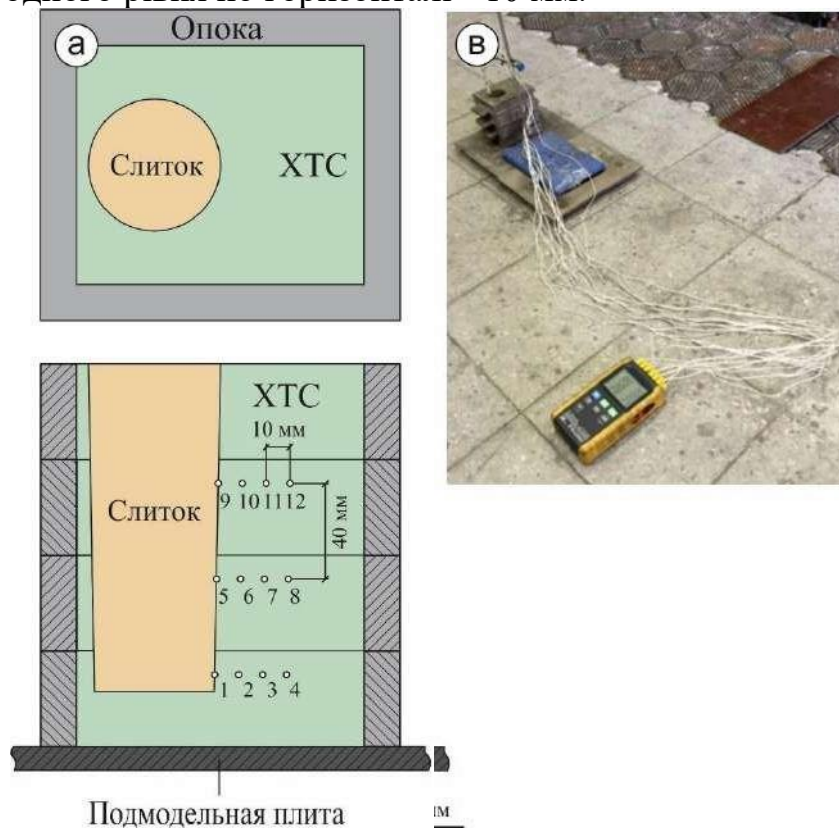


Рис 2.1 - Схема форми з ХТС і загальний вигляд зібраної форми; а) для заливання сплавів Al-7Si; в) загальний вигляд зібраної форми з ХТС зі встановленими термопарами

2.3.2. Підготовка графітової форми

У цій роботі використовувалися графітові форми різної конструкції. Перша форма використовувалася для визначення значення коефіцієнта теплопередачі між злитками зі сплавів Al-7Si і чистого алюмінію марки А99.

Друга графітова форма слугувала для визначення значень коефіцієнтів теплопередачі між злитками зі сплавів Al-3Si і Al-12Si і графітовою формою. Причиною заміни форми стало пошкодження першої форми під час експерименту і неможливість вилучення виливки з форми без її руйнування. Усе це призвело до внесення змін у конструкцію під час створення другої форми. Оскільки під час моделювання при створенні розрахункової моделі враховувалася геометрія виливки і форми, а також геометричні розміри злитка і форми для першої і другої форми схожі, результати визначення коефіцієнта теплопередачі в обох формах можна порівнювати між собою.

Першу форму виготовляли з графіту марки ГМЗ (ТУ 48-4802-86-97) шляхом фрезерування графітових блоків. Форма давала змогу отримувати циліндричний виливок діаметром 50 мм, висотою 100 мм. Схему розташування термопар у формі представлено на рис. 2.1. Термопари розташовували на двох рівнях за висотою: нижній рівень - термопари Т1, Т2, Т3, Т4 (між частинами форми I і II), рис. 2.2 (б); верхній рівень - термопари Т6, Т7, Т8, Т9 (між частинами форми II і III), рис. 2.2 (в). Відстань між нижнім і верхнім рівнем по вертикалі становила 40 мм. Відстань від робочої поверхні форми до термопар Т1, Т6 - 2 мм; Т2, Т7 - 5 мм; Т3, Т8 - 10 мм; Т4, Т9 - 20 мм. Термопару Т5 поміщали в керамічну трубку, і її спай перебував у порожнині форми на відстані 10 мм від робочої поверхні форми. Термопара Т10 перебувала на відстані 5 мм від бічної зовнішньої поверхні форми. Ця термопара використовувалася для визначення коефіцієнта теплопередачі форма-форма (графіт-графіт). Для цього забезпечувалося заливання розплаву у форму так, щоб він не потрапляв на конусну поверхню. У цьому випадку частина форми IV нагрівається тільки через поверхню контакту графіт-графіт, оскільки через конусну форму внутрішньої поверхні випромінювання з вільної поверхні залитого металу також не бере участі в теплопередачі. Фіксацію термопар здійснювали за допомогою графітових елементів, що кріпляться до форми шурупами саморізами.

Шорсткість поверхні форми, що контактувала зі сплавом, визначали профілометром "Marsurf M 300C". Шорсткість внутрішньої поверхні форми становила $R_z = 25$ мкм і $R_a = 4$ мкм.

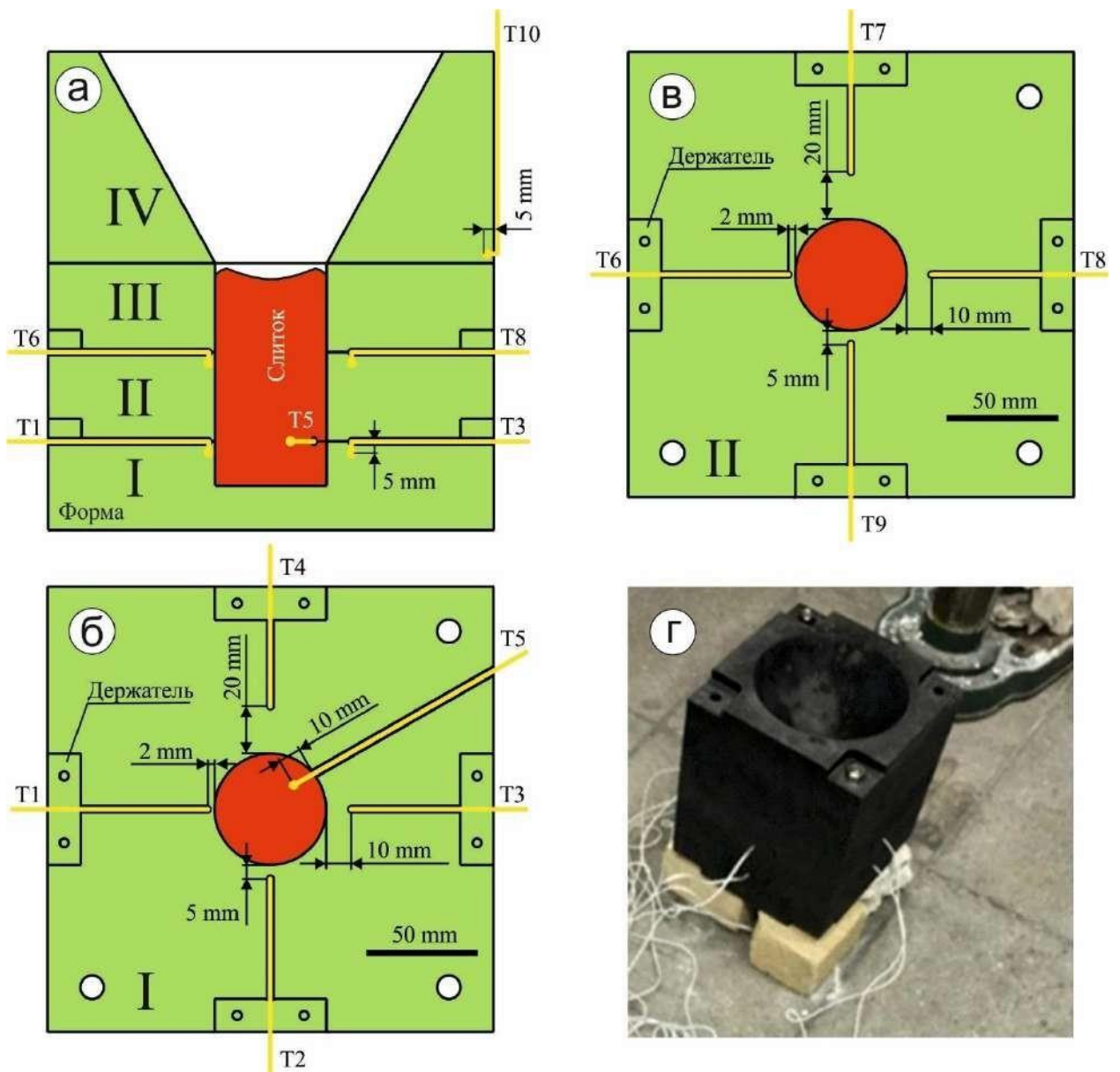


Рис 2.2 - Схема розташування термопар у формі з графіту номер 1; а) - форма в розрізі; б) - вид на частину форми I; в) - вид на частину форми II; г) - загальний вигляд форми в зборі зі встановленими термопарами

Другу графітову форму виготовляли так само, як і першу з графіту марки ГМЗ, шляхом фрезерування графітового блоку на верстаті з ЧПУ. Перша форма була сконструйована так, що метал заливався по роз'єму і були складнощі з витяганням злитків. Тому і було прийнято рішення сконструювати форму з вертикальною площиною роз'єму.

Форма являє собою паралелепіпед заввишки 160 мм, завдовжки 160 мм і завширшки 100 мм, форма має вертикальний роз'єм для вилучення циліндричного вилівка. Одержуваний злиток мав висоту 107 мм і діаметр 55 мм. Схему розташування термопар наведено на рис. 2.3. Для встановлення хромель-алюмелевих термопар у стінці форми з боку роз'єму просвердлювали свердлом 2 отвори в лівій напівформі (рис. 2.3, а) і 3 отвори в правій напівформі (рис. 2.3, в), діаметром 2 мм і глибиною 3 мм. Гарячі спаї термопар розташовувалися від межі розділів метал-форма на 2 і 5 мм у лівій напівформі і

на 5, 10 і 20 мм у правій напівформі. Спаї термопар T2 і T5 перебували на однаковій відстані від робочої поверхні форми, але T2 була на бічній поверхні, а T5 знизу. Хромель-алюмелеві термопари встановлювалися у висвердлених для них каналах, і фіксувалися за допомогою металевих пластин, представлених на рис. 2.3, (в). Пластины вставлялися в спеціальні заглиблення, зроблені в лівій і в правій половинах форми, і кріпилися двома саморізами. Фіксація термопар металевими пластинами відбувалася на ізолюваній ділянці термопари. Роль центрувальних штирів виконували п'ять металевих пластин, що фіксують термопари. Графітову форму під час заливки фіксували за допомогою струбцин, щоб запобігти розкриттю форми і протіканню розплаву. Загальний вигляд форми на площину роз'єму з одержуванним виливом представлений на рис. 7 (г). На рисунку 2.3 (д) представлений загальний вигляд форми в зібраному стані перед заливкою виливки.

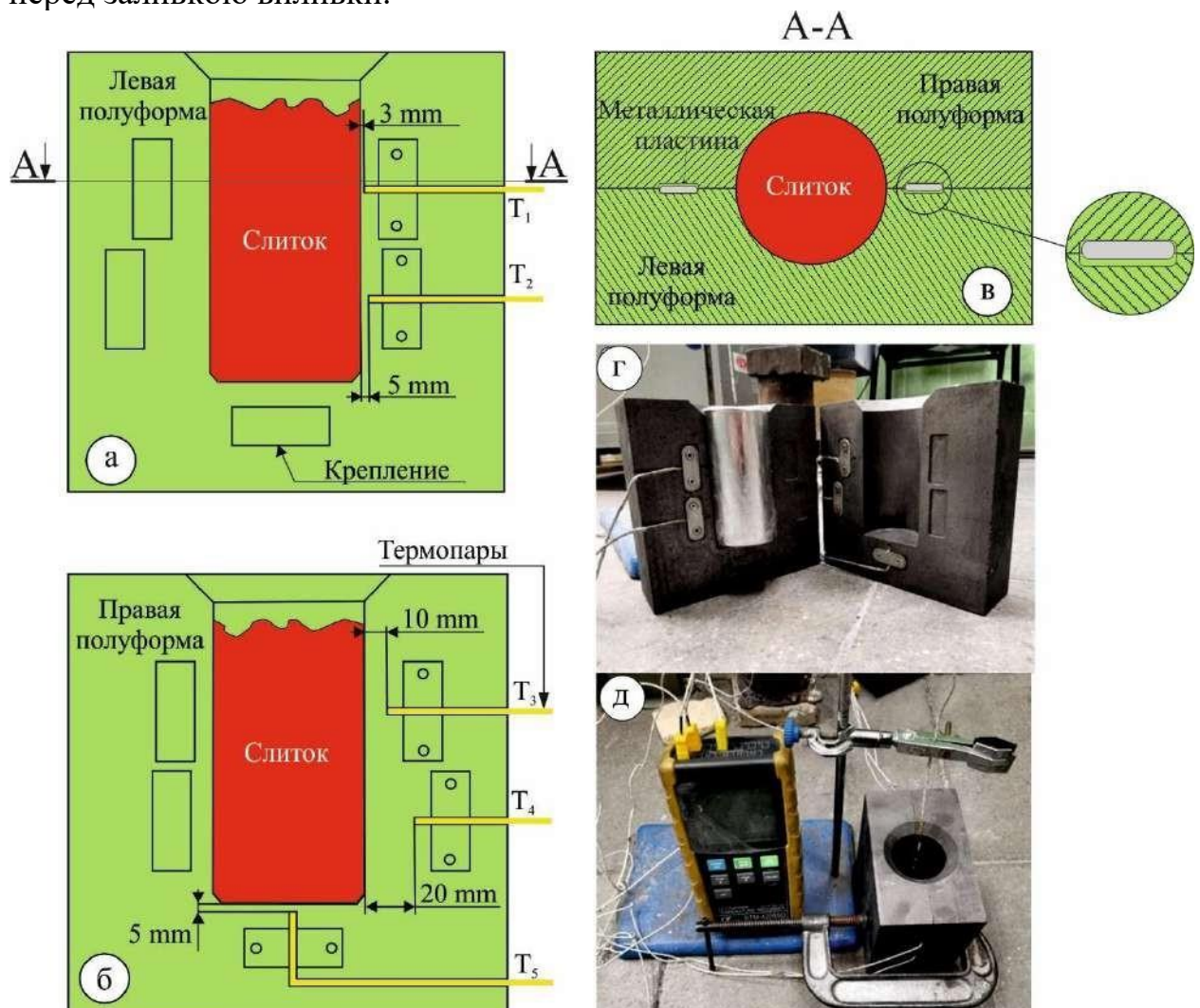


Рис. 2.3 - Схема розташування термопар у формі з графіту №2 і загальний вигляд форми; а) вид на ліву напівформу при відкритій правій; б) вид на праву напівформу при відкритій лівій; в) розріз форми в зборі; г) загальний вигляд форми в розкритому стані з одержуваною виливою; д) загальний вигляд форми в підготовленому стані перед заливанням зі встановленими термопарами

2.2.3. Підготовка металевої форми

Як форму було використано виливницю зі сталі Ст3 для отримання циліндричних злитків, загальний вигляд металевої форми представлено на рис. 2.4 (в). Одержуваний циліндричний злиток мав висоту 140 мм і діаметр 35 мм, товщина стінок форми становила 22 мм.

Торці виливниці були відфрезеровані. У зовнішній стінці форми були просвердлені чотири отвори діаметром 2 мм різної глибини. В отворах за допомогою термоклею "АлСіл 5" (ТУ 2252-002-45865111-01), були закріплені хромель-алюмелеві термопари, які розташовувалися на відстанях 2, 5, 10 і 15 мм від внутрішньої стінки виливниці. Схема розташування термопар показана на рис. 2.4 (а, б). У роботі було визначено шорсткість внутрішньої поверхні форми. Відомо, що в процесі використання форми її шорсткість може змінюватися, тому вимірювання проводилися після завершення експериментів. Шорсткість внутрішньої поверхні форми становила $Rz = 25$ мкм і $Ra = 4$ мкм, тобто виявилася такою ж, як і в графітової форми. Загальний вигляд сталевий форми представлений на рис. 2.4 (в).

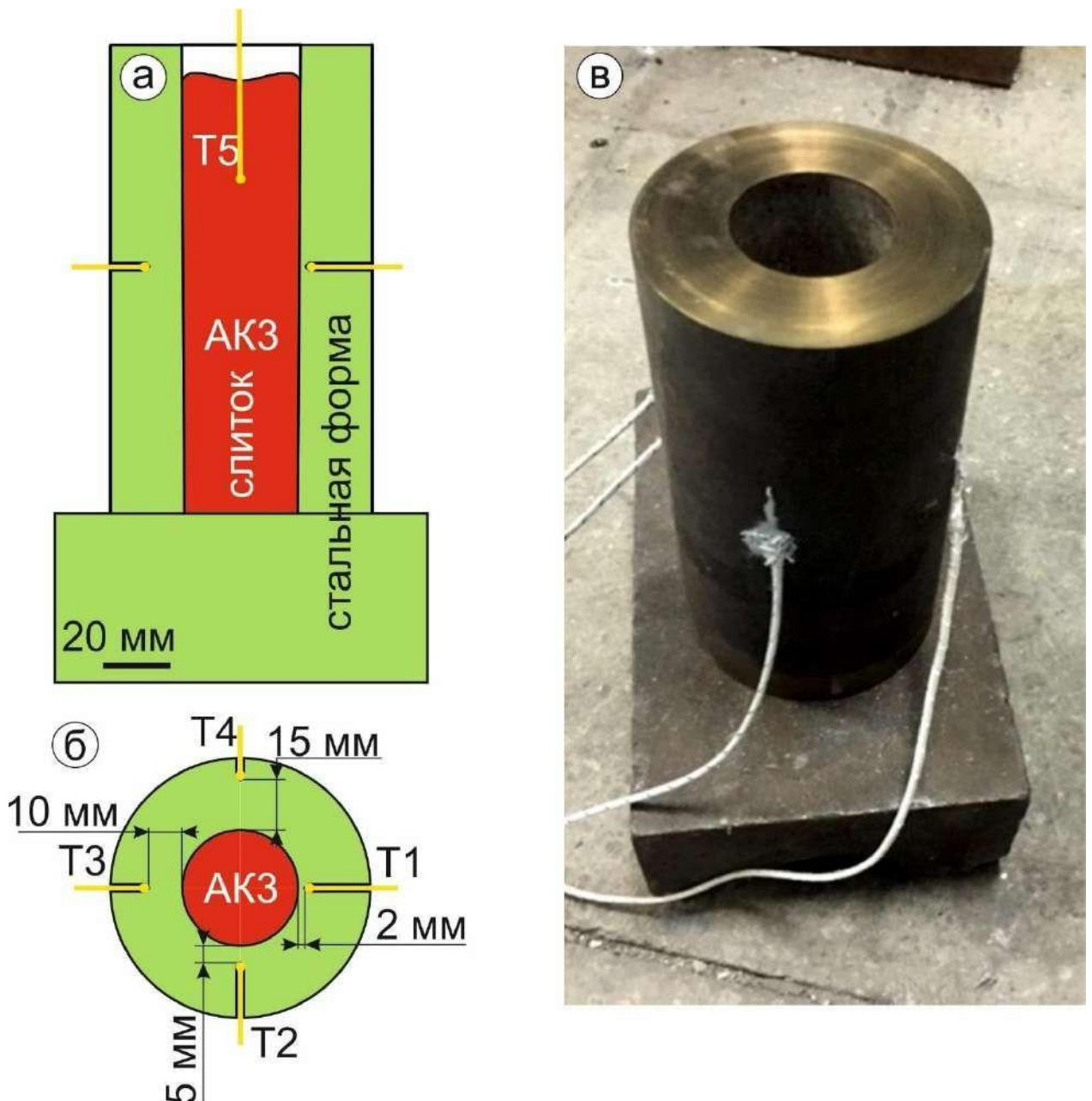


Рис 2.4 - Схема розташування термопар у формі зі сталі Ст3 і загальний вигляд форми; а) форма в розрізі вид збоку; б) вид на форму зверху; в) загальний вигляд форми зі встановленими термопарами

2.4. Методика отримання експериментальних температурних кривих

Після приготування сплавів на основі Al (Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si), і підготовки форм із графіту, сталі та ХТС здійснювали заливку з одночасним записом експериментальних температурних полів за допомогою 12 каналного термовимірювача "VTM-4208SD"

Сплави на основі Al, Cu заливали у форми з ХТС, сталі та графіту за різної температури, від 720 °С до 1160 °С.

Перший експеримент із заливання сплаву в графітову форму показав, що отримані температурні криві не є достовірними. Наприклад, для низки показань низки термопар практично збігалися, незважаючи на те, що вони

перебували на різній відстані від межі розділу метал-форма. Судячи з усього, це пов'язано з тим, що графіт є матеріалом з високою електропровідністю і термопари можуть утворювати електричні ланцюги під час одночасного вимірювання в декількох точках. Подібне явище не описано в інших роботах, оскільки під час проведення досліджень з електропровідними формами (металевими або графітовими) термопари мали електричну ізоляцію. Щоб виключити вплив термопар одна на одну були змінені умови експерименту. Під час подальших заливок запис проводили по черзі, окремо для кожної термопари, після чого злиток розплавляли і повторювали експеримент. Аналогічну методику застосовували і для сталевих форми.

Запис для кожної термопари, що знаходиться у формі і безпосередньо у виливку, повторювали від 2 до 5 разів. Час тривалості запису в середньому становив півтори-дві години, за такий час форма встигала охолонути до температури 40-50 °С, після чого виливок витягували з форми і давали формі охолонути до кімнатної температури, далі повторювали експеримент.

2.5. Методика визначення хімічного складу сплавів

Для розрахунку теплофізичних властивостей сплавів, а також форми зі сталі визначали склад сплавів. Оскільки вміст основних і 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 використовували циліндричні плоскопаралельні зразки, відрізані від низу злитка висотою 10 мм. Потім зразки зачищали на наждачному папері із зернистістю 200, 400, 600 Р, і після цього визначали хімічний склад за допомогою багатоканального оптичного емісійного спектрометра "ARL-4460".

На рис. 2.5 представлено подвійну діаграму стану для системи Al-Si, розраховану в програмі "Thermo-Calc". На діаграмі вертикальними лініями показано використовувані в цій роботі сплави, а саме Al-3Si, Al-7Si і Al-12Si. Як видно з діаграми стану, всі сплави є доевтектичними і відрізняються температурним інтервалом кристалізації. Температурний інтервал кристалізації ($\Delta T_{\text{крист.}}$) визначається різницею між температурою ліквідуса ($T_{\text{лик.}}$) і температурою солідуса ($T_{\text{сол.}}$) сплаву.

Для сплаву Al-3Si цей інтервал становить 66 °С (від 642 °С до 576 °С), що є найбільшим серед розглянутих сплавів. Для сплаву Al-7Si температурний інтервал становить 61 °С (від 617 °С до 556 °С). Сплав Al-12Si має найвужчий температурний інтервал кристалізації, який становить 13 °С (від 589 °С до 576 °С). Однак сплав Al12Si є евтектичним сплавом, де кристалізація відбувається за постійної температури 576 °С до моменту повного затвердіння, але за хімічним складом цей сплав містить ~11% Si що збільшує його температурний інтервал кристалізації.

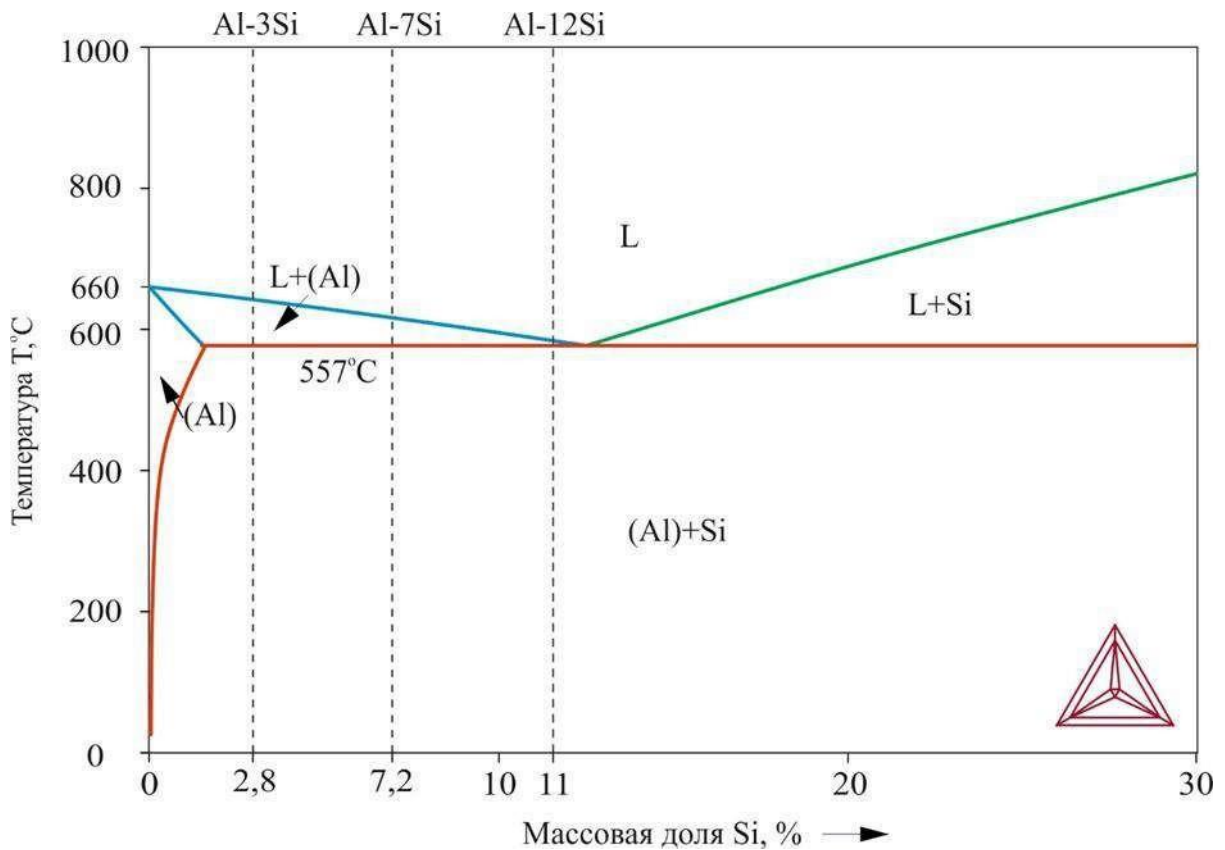


Рис 2.5 - діаграма стану сплавів на основі системи Al-Si

За вмістом основних легуючих елементів і домішок виливки відповідають сплавам Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si. Для сплавів Al-3Si і Al-12Si основними компонентами є Al і Si, а в сплаві Al-7Si також містилася невелика кількість магнію, оскільки його готували зі сплаву АК7ч. Сплав Al12Si за своїм складом відповідає марці (АЛ2) (ГОСТ 1583-93). Сплав Al3Si не має аналогів у ГОСТі 1583-93. Вміст хімічних елементів у сплавах на основі Al-Si представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - хімічний склад сплавів на основі Al

Сплав	Форма	Вміст, %						
		Основні компоненти			Домішки, до			
		Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn
Al-7Si (АК7ч)	ХТС	Ост.	6,01	0,58	0,07	0,57	0,30	0,20
	Сталь	Ост.	7,20	0,50	0,002	0,06	0,04	0,003
	Графіт	Ост.	7,41	0,38	0,01	0,16	0,06	0,12
	ГОСТ 1583-93	Ост.	6,0- 8,0	0,2 0,4-	0,5	0,6	0,2	0,30
Al-3Si	Сталь	Ост.	2,81	0,02	0,01	0,10	0,19	0,01
	Графіт	Ост.	2,88	0,004	0,004	0,118	0,06	0,008
Al-12Si	Сталь	Ост.	11,07	0,06	0,05	0,339	0,20	0,06
	Графіт	Ост.	10,66	0,002	0,002	0,097	0,01	0,002

(АЛ2)	ГОСТ 1583-93	Ост.	10-13	-	-	0,7	0,6	0,3
А99	ГОСТ 11069-2001	Ост.	0,003	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003
	Сталь	Ост.	0,003	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003
	Графіт	Ост.	0,003	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003

2.6.Методика визначення коефіцієнтів теплопередачі для різних пар метал-форма

Для визначення значення коефіцієнта теплопередачі на межі розділу метал - форма було проведено моделювання процесу заповнення і затвердіння циліндричних виливків зі сплавів Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si і чистого алюмінію марки А99 у форми з ХТС, сталі Ст3 і графіту за різних значень коефіцієнта теплопередачі в програмі "ProCast".

Для моделювання заповнення виливків та їхнього затвердіння задавали початкові температури, а також тривалості заповнення, зазначені в таблиці 2.2. Саме ці значення були характерні для заливки реальних злитків. Час заповнення сталевих форм, 3 секунди під час заливання графітової форми і 4 секунди під час заливання форми з ХТС. У таблиці 2.2 подано температури заливки, початкову температуру форм і температури ліквідусу і солідусу сплавів. Температури ліквідусу і солідусу розраховували за допомогою термодинамічної бази програми "ProCast" за моделлю нерівноважної кристалізації Шейля-Гуллівера.

Таблиця 2.2 - Основні параметри для моделювання для різних пар сплав/форма

Сплав	Матеріал форми	Характеристики форми		Температура сплаву, °С		
		Час заповнення, с	Початкова температура, оС	Заливки	Солідуса	Ліквідус
Al-7Si	ХТС	4	25	690	556	617
Al-7Si	Сталь	3	25	720	552	612
Al-3Si		4	23	720	576	642
Al-12Si		4	24	720	576	589
Al-7Si	Графіт (форма №1)	3	30	720	546	609
А99		4	25	720	656	660
Al-3Si	Графіт	4	24	720	576	642

Al-12Si	(форма №2)	4	25	720	576	589
---------	------------	---	----	-----	-----	-----

Комп'ютерне моделювання дало змогу отримати розраховані температурні криві під час заповнення, затвердіння й охолодження злитка у формі за заданого значення коефіцієнта теплопередачі.

Коефіцієнт теплопередачі в програмі "ProCast" зазвичай задають у вигляді фіксованого значення, яке не залежить від температури поверхні виливки або часу. У цій роботі знаходили залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливки. Значення коефіцієнта теплопередачі під час моделювання заливання злитків у форму з ХТС задавали таким чином.

Вище за температури ліквідусу задавали значення h_{liq} з кроком $100 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ в інтервалі значень від 100 до $3000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, а нижче за температуру солідусу значення коефіцієнта h_{sol} з тим самим кроком в інтервалі від 100 до $3000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. В інтервалі кристалізації значення змінювалося від h_{liq} до h_{sol} за лінійною залежністю. На рис. 2.6, а показано схему, що демонструє зазначений підхід.

Коефіцієнт теплопередачі між сплавами і формами з графіту і сталі підбирали більш складним способом, ніж для форми з ХТС. Значення коефіцієнта теплопередачі визначали не тільки для температур поверхні виливки, що дорівнювали температурам ліквідусу та солідусу сплаву, а й у додаткових проміжних точках (t_i), що були додані вище за температуру ліквідусу, нижче за температуру солідусу та в інтервалі кристалізації сплаву, як показано на рис. 2.6, б. Проміжні точки детальніше показують поведінку коефіцієнта теплопередачі в проміжках. А так само при збільшенні проміжних точок температур збільшується точність коефіцієнта теплопередачі.

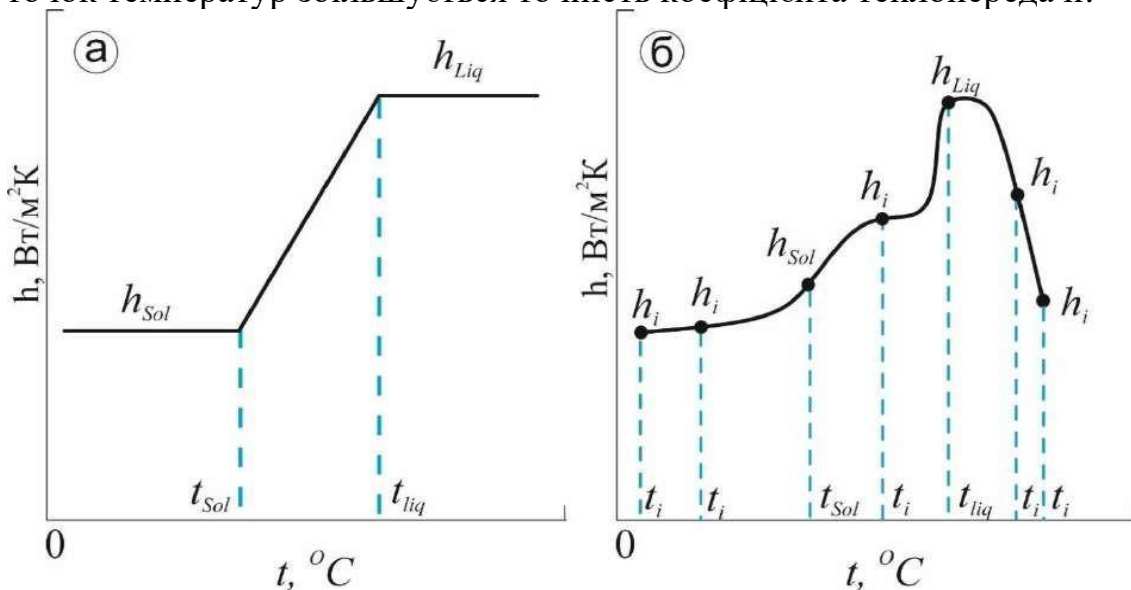


Рис 2.6 - Схема отримання графіка залежності коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливка: а) варіант зі значеннями коефіцієнта теплопередачі за температур поверхні виливки, що дорівнюють ліквідусу і солідусу сплаву, що використовується тільки для форми з ХТС, б) варіант із додатковими точками, що використовується для визначення коефіцієнта теплопередачі між виливком та формою з графіту і сталі.

На рис. 2.7 представлено блок-схему підбору коефіцієнта теплопередачі. Зі схеми видно, що в програму "ProCast" вводяться параметри моделювання, отримані під час проведення експерименту, далі у вигляді графіка задається значення коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні вилівка. Для всіх температурних точок значення коефіцієнта теплопередачі встановлюють рівним $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, після закінчення моделювання експериментальні та розрахункові температурні поля порівнюють і розраховують середню помилку за всіма термопарами за рівнянням (1).

Далі розрахунок повторюється для цієї самої температурної точки, але значення коефіцієнта теплопередачі зменшується на змінну $k=1000$ розрахунок для однієї й тієї самої температурної точки повторюється доти, доки функція помилок не стане більшою за попереднє значення. Далі розрахунок починається для наступної температурної точки.

Розрахунок коефіцієнта теплопередачі закінчується після того, як для всього діапазону обраних температур буде знайдена мінімальна помилка.

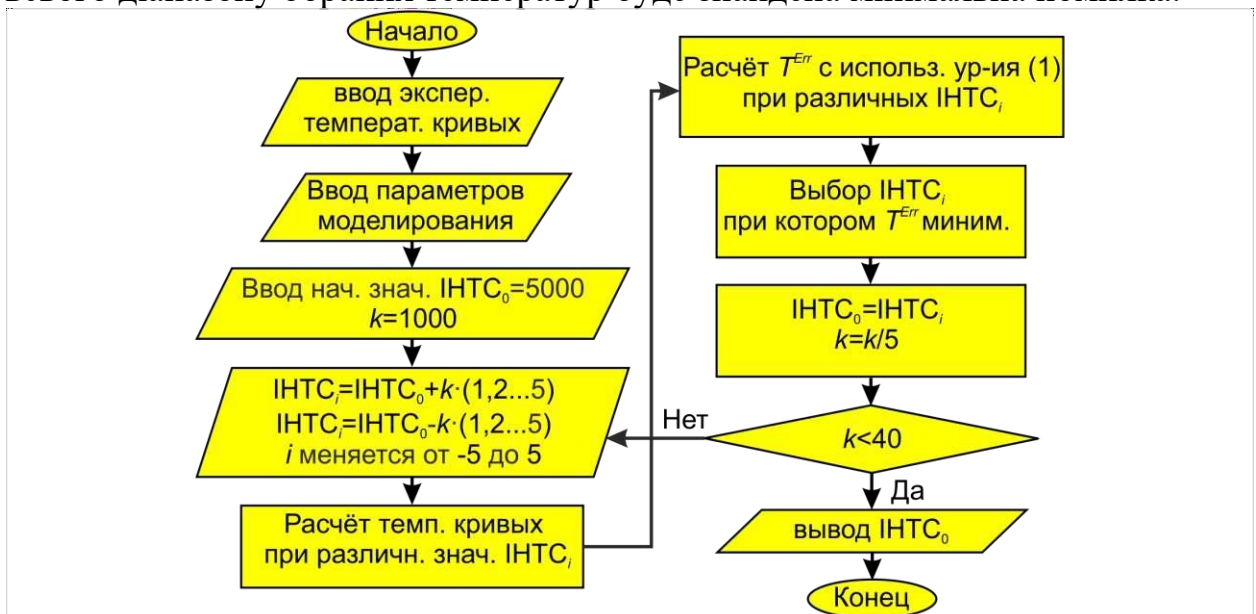


Рис 2.7 - Блок-схема підбору коефіцієнтів теплопередачі.

Де: ИТС - від англ. скорочення, значення коефіцієнта теплопередачі;
 k - змінна; i - кількість ітерацій

2.6. Методика визначення швидкості охолодження й часу затвердіння виливків різного діаметру.

У роботі було проаналізовано різні пари значень коефіцієнтів теплопередачі метал - форма..

Було проведено моделювання затвердіння 10 циліндричних злитків різного діаметру, злитки представлені на рис. 2.8. Моделювали затвердіння злитка діаметром D і висотою $2D$ за товщини стінки форми $D/2$. Діаметр злитка D змінювали від 10 до 100 мм із кроком 10 мм.

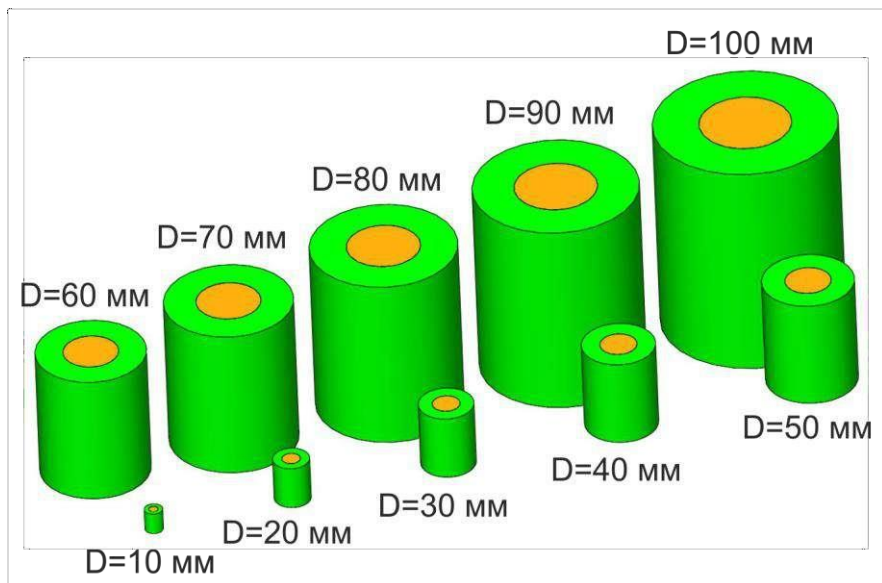


Рис. 12 - діаметри злитків і форм для розрахунку швидкості охолодження і часу затвердіння,

Як граничні умови використовували дані залежності коефіцієнта теплопередачі від температури для сплавів Al-7Si. Швидкість охолодження обчислювали як середнє значення для точок T1-T6 (рис. 2.9) .

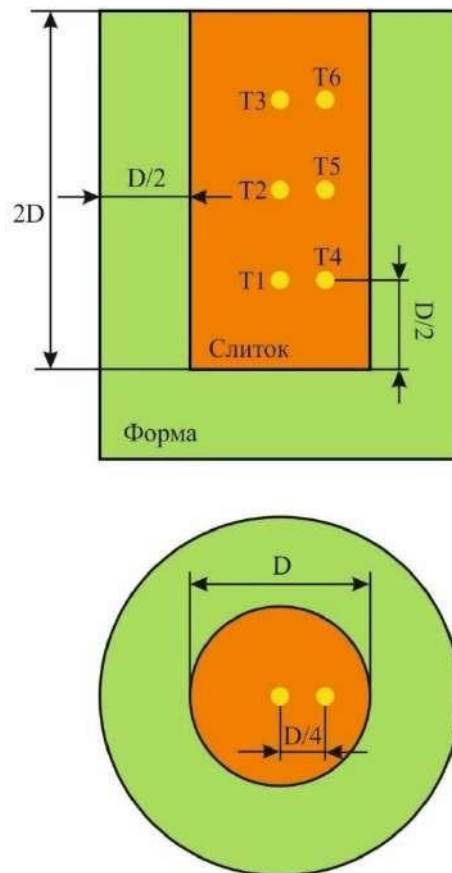


Рис. 2.9 - Схематичне зображення злитка і форми, використаних для розрахунку швидкості охолодження і часу затвердіння

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИЯВЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ МІЖ ЗЛИВКАМИ З СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Si ТА ФОРМАМИ З МЕТАЛУ, ХТС ТА ГРАФІТУ

3.1. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання різних сплавів у форму з ХТС

Було визначено коефіцієнт теплопередачі під час заливання сплавів на основі алюмінію у форму з ХТС. Значення коефіцієнта теплопередачі отримували у вигляді графіка залежності від температури поверхні виливка.

Для визначення різниці між експериментальними та розрахованими температурними полями використовували функцію помилок. Значення функції помилок неоднакове як для термопар, розташованих на різних рівнях (за висотою), так і для термопар, встановлених на одному рівні, але розміщених на різній відстані від поверхні виливка. Для визначення коефіцієнта теплопередачі найбільш важливими є показання термопар, розміщених безпосередньо на межі контакту металу з формою.

Для сплавів Al-7Si температурні поля були зафіксовані протягом перших 1500 секунд з моменту початку заливки. Після цього часу, в результаті моделювання, спостерігалось прогрівання поверхні форми, що контактує з металевою опокою, що призводило до зміни температурного поля. Це означає, що на подальшу зміну температурного поля починають впливати коефіцієнти теплопередачі між формою та алюмінієвою опокою, а також між формою та алюмінієвою плитою. Одночасне визначення декількох коефіцієнтів теплопередачі для різних поверхонь розділу представляє істотні складнощі, тому обмежилися значеннями часу, зазначеними вище.

Розрахункові значення функції помилки t_{Err} (°C), обчислені за формулою (1), для областей значень коефіцієнта теплопередачі при температурі ліквідусу (h_L) від 400 до 800 Вт/(м² · К) та при температурі солідусу (h_S) від 100 до 500 Вт/(м² · К) подано на рисунку 3.1, (а). Можна бачити, що величина помилки зменшується при збільшенні значень коефіцієнта теплопередачі при температурі ліквідусу h_L і солідусу h_S і шукана величина коефіцієнта теплопередачі має вищу величину, яка не вкладається в зазначений вище діапазон.

На рисунку 3.1, (б) наведено результати розрахунку функції помилки t_{Err} (°C) для значень коефіцієнта теплопередачі за температури ліквідусу сплаву h_L від 900 до 1200 Вт/(м² · К) і від температури солідусу сплаву h_S від 500 до 900 Вт/(м² · К). В області цих значень коефіцієнта теплопередачі величина функції помилок практично не змінюється і знаходиться в межах 21,6 - 22,1 °C. Причина цього може полягати в невеликому зміщенні положення термопар під час проведення експерименту відносно розрахункових точок у моделі, використаних під час моделювання та в експериментах. Значення функції помилок неоднакове як для термопар, розташованих на різних рівнях (за висотою), так і для термопар, встановлених на одному рівні, але розміщених

на різній відстані від поверхні виливки. Найбільш важливими для визначення значення коефіцієнта теплопередачі є показання термопар, розміщених безпосередньо на кордоні контакту металу з формою (Т1, Т5, Т9), - мінімальне значення функції помилок для них було отримано при значенні коефіцієнта теплопередачі h_L , що дорівнює $900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і h_S , що дорівнює $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

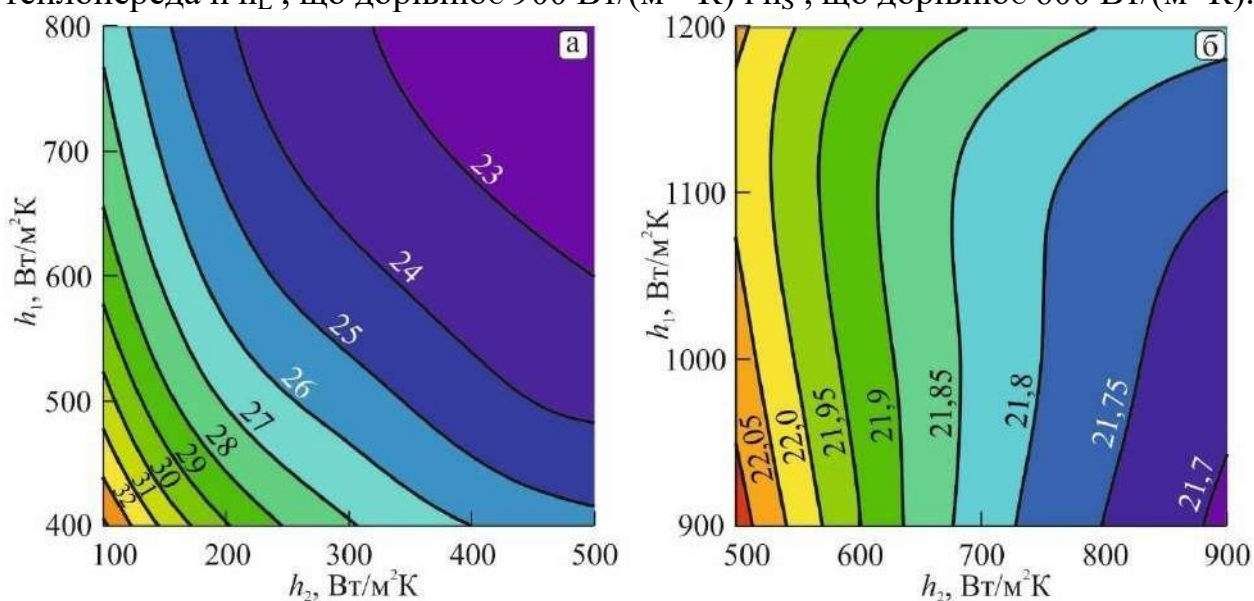


Рисунок 3.1 - Розрахункові величини функції помилки t_{err} (°C) для областей значень коефіцієнта теплопередачі: а) $h_L = 400 \div 800$, $h_S = 100 \div 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; б) $h_L = 900 \div 1200$, $h_S = 500 \div 900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Після зіставлення експериментально отриманих і змодельованих температурних залежностей від часу, шляхом мінімізації функції помилок було отримано графік залежності коефіцієнта теплопередачі від температури, представлений на рисунку 3.2. Значення коефіцієнта теплопередачі вище за температуру ліквідусу становило $900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Від температури ліквідусу сплаву 617 °C до температури солідусу сплаву 556 °C , як було зазначено раніше, воно задавалося у вигляді лінійної залежності. Від температури солідусу до кімнатної температури, значення коефіцієнта теплопередачі становило $600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

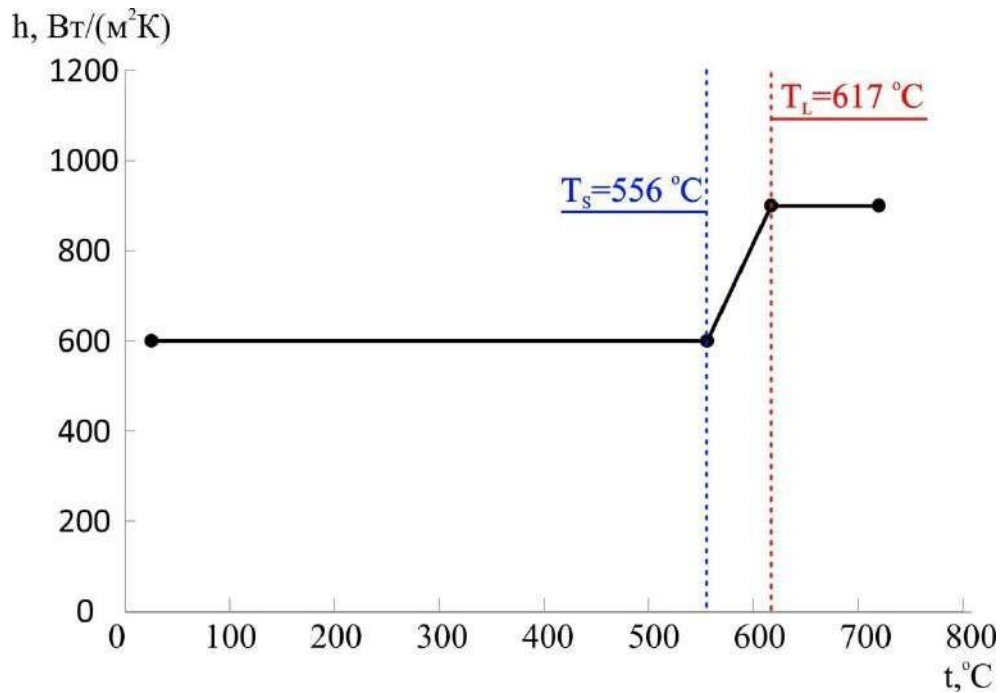


Рисунок 3.2 - Залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливки для сплаву Al-7Si під час лиття у форму з ХТС

На рисунку 3.3 представлено графіки температурних залежностей від часу під час заливання сплаву Al-7Si у форму з ХТС. Термопары розташовувалися на трьох рівнях по висоті з відстанню в 40 мм (рисунок 23 (д)). І на відстані 1, 10, 20 і 30 мм від межі розділу метал-форма на кожному рівні (рисунок 3.3 (г)). На рисунку вони рознесені за трьома графіками: рисунок 3.3 (а) перший рівень, де розташовуються термопары T1, T3, T4, рисунок 3.3 (б) другий рівень для термопар T5, T6, T7, T8. Рисунок 3.3 (в) третій рівень T9, T10, T11, T12. На рисунку 3.3 (а, б, в) червоною пунктирною лінією позначено змодельовані температурні залежності від часу з визначеними значеннями коефіцієнтів передачі (рис. 3.2), а суцільною синьою лінією показано температурні залежності, отримані експериментальним шляхом. Графік температурної залежності від часу для термопары T2 не був представлений у зв'язку зі зміщенням термопары у формі під час проведення експерименту і поганим збігом із розрахованою температурною залежністю від часу, отриманою за допомогою моделювання.

Максимально допустиме відхилення спостерігається для термопары T4, представленої на рисунку 3.3 (а), і термопары T7, представленої на рисунку 3.3 (б), розбіжність склала 40 і 60 °C відповідно для термопар T4 і T7. Для решти термопар спостерігається гарний збіг між експериментально отриманими і змодельованими температурними залежностями від часу, для яких значення розбіжності не перевищує 30 °C.

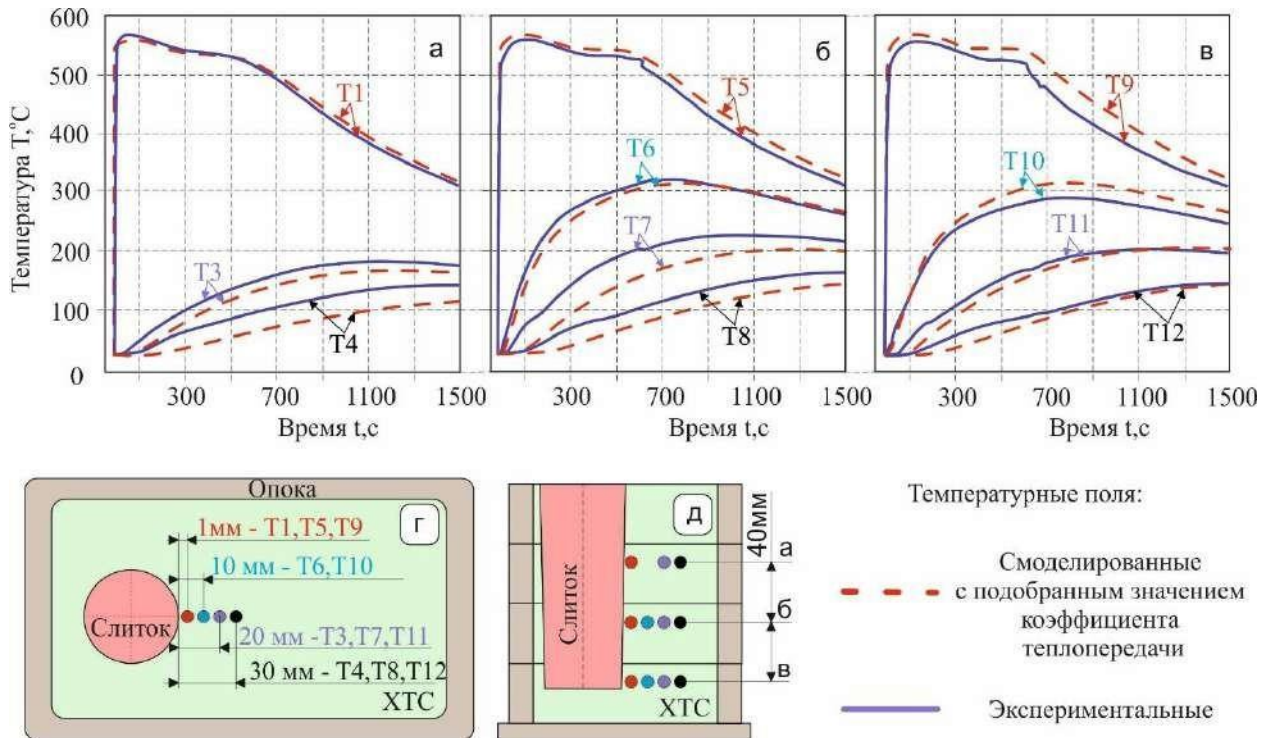


Рисунок 3.3 - Експериментальні (суцільні Т1-Т12) і отримані в процесі моделювання (пунктирні Т1-Т12) температурні залежності для випадку заливки сплаву Al-7Si у форму з ХТС: а) термопар Т1, Т3, Т4; б) термопар Т5-Т8; в) термопар Т9-Т12; г) схема розташування термопар у формі, вид згори; д) схема розташування термопар у формі, вид збоку.

На рисунку 3.4 представлено результати вимірювання діаметрів злитка зі сплаву Al-7Si, отриманого під час експерименту, і ливарної моделі, за якою отримували порожнину форми, залежно від висоти. Можна бачити, що в нижній частині діаметри виливки і моделі практично збігаються. Це пов'язано з притисненням твердої кірки в зливку, що формується, до стінки форми під дією металостатичного тиску (максимального в нижній частині злитка). У верхній частині злитка, де металостатичний тиск значно менший, різниця між діаметрами моделі та злитка значно більша (рисунок 3.4). Отже, у верхній частині форми в процесі затвердіння злитка був більший зазор, а в нижній менший. З цієї причини для верхньої і нижньої поверхні злитка спостерігається неоднакове значення коефіцієнта теплопередачі. Але загалом ця різниця не настільки значна і використання середнього значення цілком припустиме для інженерних розрахунків.

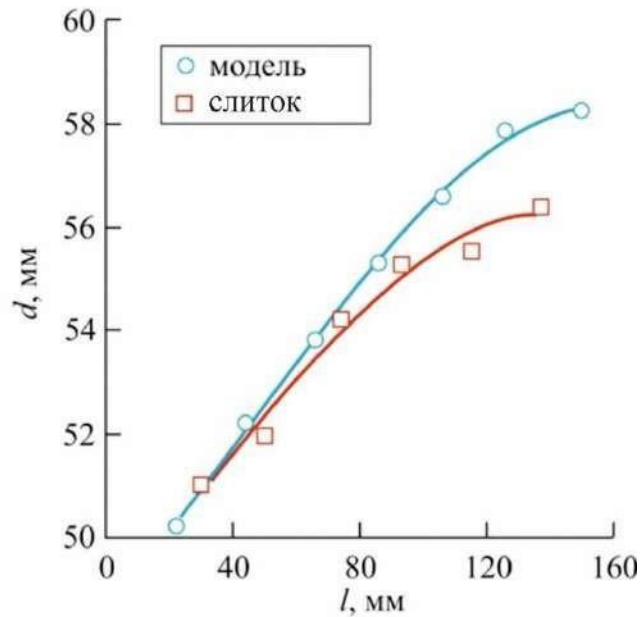


Рисунок 3.4 - Діаметри (d) зливки, отриманого під час експерименту (червона лінія), і моделі, за якою отримували порожнину форми (синя лінія), залежно від їхньої висоти (l)

3.2. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання різних сплавів у форму зі сталі Ст3.

Під час цієї роботи було визначено коефіцієнти теплопередачі між зливками зі сплавів Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si, і металевою формою зі сталі Ст3. Як і для форм із ХТС, розрахунок отримували температурні залежності коефіцієнта теплопередачі шляхом мінімізації функції помилок. Оскільки в даному випадку температури в зливку і формі змінюються більш інтенсивно, вид залежності коефіцієнта теплопередачі від температури може бути складнішим і задавати його як для форми з ХТС за двома точками (постійне значення вище за температуру ліквідусу і постійне значення нижче за температуру солідусу) не зовсім вірно. Тому крім значень коефіцієнта теплопередачі вище за температуру ліквідусу і нижче за температуру солідусу задавали проміжні температурні точки (t_i).

На рисунку 3.5 зображено графіки залежності коефіцієнтів теплопередачі від температури поверхні злитків, виготовлених зі сплавів Al3Si (а), Al-7Si (б), Al-12Si (в), що заливаються у форму зі сталі Ст3.

Графіки залежності для сплавів Al-3Si, Al-7Si і Al-12Si схожі, але мають деякі відмінності. Для всіх сплавів спостерігається зростання коефіцієнта теплопередачі від температури заливки 720°C до температури, близької до температури ліквідусу сплавів. При цьому значення коефіцієнта теплопередачі в цьому випадку максимальне 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 розплавом до поверхні форми за рахунок гідростатичного напору. При цьому процеси усадки ще не почалися і зазор між кіркою сплаву і формою ще не почав формуватися.

Для сплаву Al-3Si коефіцієнт теплопередачі становив $2320 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$ при температурі T_L 576°C , для сплаву Al-7Si - $1550 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ при температурі T_L

612°C, а для сплаву Al-12Si значення коефіцієнта теплопередачі становило лише 280 (Вт/м² К) при температурі T_L , що дорівнює 589°C. Тобто коефіцієнт теплопередачі саме при температурі ліквідусу не максимальний. Важливо відзначити, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі для сплаву Al-3Si становить 2600 Вт/(м² К) за температури 658 °С. Для сплаву Al-12Si рисунок 3.5 (в) на кривій залежності можна спостерігати, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі 556 °С і становить 2500 Вт/(м² К). Для сплаву Al-7Si також не спостерігається максимального значення коефіцієнта теплопередачі при температурі ліквідусу, воно досягається при температурі поверхні злитка 633 °С і становить 2050 Вт/(м² К). Можна помітити, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі, вищій за температуру ліквідусу сплаву, для всіх сплавів, крім сплаву Al-12Si. Для цього сплаву максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається при температурі, нижчій за солідус сплаву. Очевидно, це пов'язано з тим, що для сплавів Al-3Si і Al-7Si розрахована температура ліквідусу дещо відрізняється від експериментальної. Ще однією причиною може бути розглянута раніше інерційність термопари. Що ж стосується сплаву Al-12Si, то слід враховувати, що від розрахованої температури ліквідусу (589 °С) до температури евтектичного перетворення (576 °С) спостерігається формування невеликої кількості первинних кристалів, і, вочевидь, вони не здатні забезпечити гарний тепловий контакт між злитком і формою.

За температур солідусу 576 °С, 552 °С, 576 °С для трьох сплавів - Al3Si, Al-7Si і Al-12Si - значення коефіцієнта теплопередачі становили відповідно 1000 Вт/(м² К), 550 Вт/(м² К) і 1500 Вт/(м² К). Можна бачити, що в міру зростання частки твердої фази в сплаві (також представлена на рис. 3.5) відбувається значне зниження коефіцієнта теплопередачі. Особливо добре це простежується для сплавів Al-3Si і Al-7Si. Що ж стосується сплаву Al-12Si, то для нього основна зміна коефіцієнта теплопередачі відбувається нижче температури солідусу. Очевидно, незважаючи на дуже вузький інтервал кристалізації, зміна коефіцієнта теплопередачі відбувається в інтервалі температур.

Значення коефіцієнта теплопередачі для трьох сплавів залишається практично незмінним від температури поверхні вилівка 400°C і до кімнатної температури 20°C і становить 200 Вт/(м² К).

Таким чином, можна вважати, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається поблизу температури ліквідусу сплаву. У міру протікання процесу затвердіння і формування твердої кірки коефіцієнт теплопередачі починає знижуватися через формування зазору між виливком формою. Нижче за температуру солідусу на графіках зміни коефіцієнта теплопередачі є майданчики, ширина яких збільшується в міру збільшення вмісту кремнію в сплаві. Очевидно, наявність цього майданчика може бути пов'язана з евтектичним перетворенням, оскільки його ширина збільшується зі збільшенням частки евтектики в сплаві.

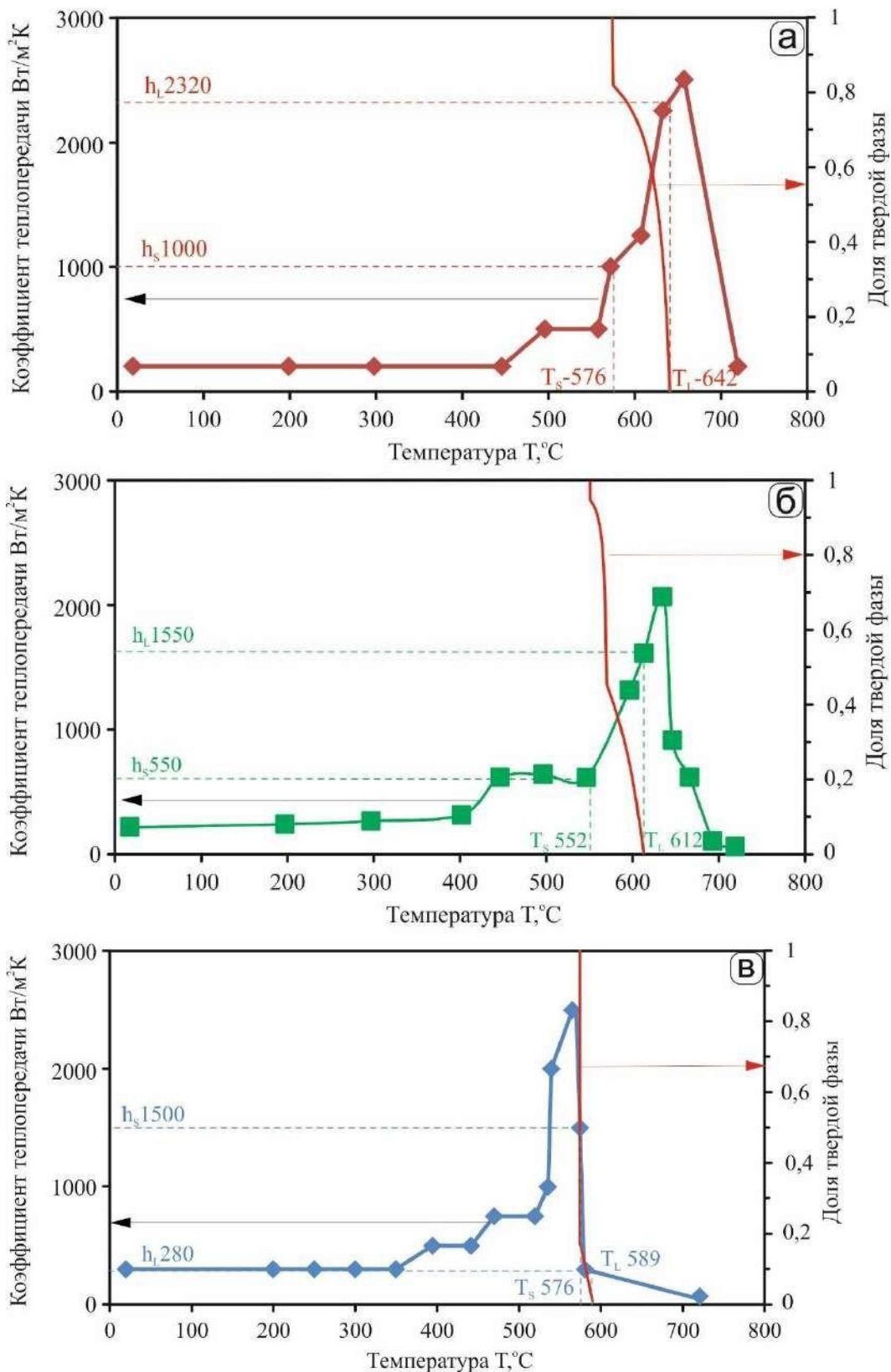


Рисунок 3.5 - Графіки залежності коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні злитка зі сплавів Al-3Si(a), Al-7Si(б), Al-12Si(в) під час заливання у форму зі сталі Ст3.

На рисунку 3.6 представлено температурні поля для термопар T1-T4, отримані під час експерименту (суцільні сині лінії), розрахункові температурні поля за використання знайденої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури, представлені на рис. 3.5 (червоні суцільні лінії), отримані за постійного значення коефіцієнта теплопередачі, що дорівнює 500 Вт/м·К (зелені пунктирні лінії). 30 (червоні суцільні лінії) і температурні поля, отримані за

постійного значення коефіцієнта теплопередачі, що дорівнює $500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ (зелені пунктирні лінії). Також на рисунку показано схему розташування термопар.

На графіках спостерігаються невеликі розбіжності (до $15 \text{ }^\circ\text{C}$) між експериментальними та розрахунковими кривими, отриманими за використання залежності коефіцієнта теплопередачі від температури, що подана на рисунку 3.6 для термопар Т1-Т4 протягом усього інтервалу запису температур. Розбіжності між експериментальними і розрахунковими температурами в зливку для термопар Т5, яка розташована в розплаві, також не перевищують $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Однак, спостерігаються більш значні розбіжності (до $35 \text{ }^\circ\text{C}$ для термопар Т1Т4 і до $215 \text{ }^\circ\text{C}$ для термопар Т5) між експериментальними і розрахунковими температурами при моделюванні з фіксованим значенням коефіцієнта теплопередачі $500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Це свідчить про те, що розподіл температур у формі та у виливку за використання фіксованого значення коефіцієнта теплопередачі значно відрізняється від реальних умов розподілу температур під час проведення експерименту. І тому для отримання достовірних кривих розподілу температури, при моделюванні в СКМ ЛП, необхідно використовувати складну залежність коефіцієнта теплопередачі від температури, що враховує його зміну під час процесу затвердіння.

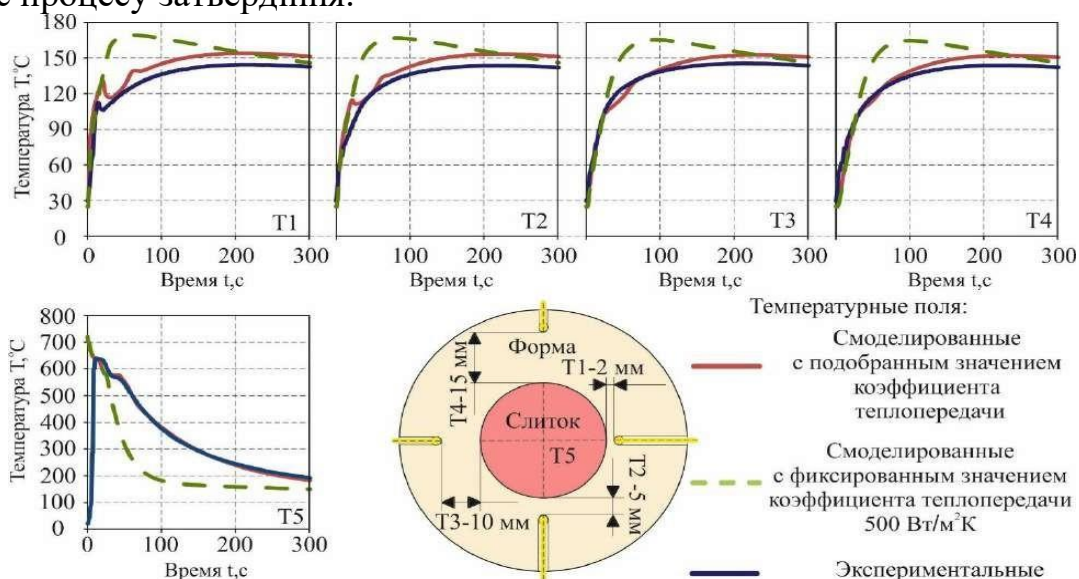


Рисунок 3.6 - Експериментальні (суцільні сині Т1-Т5), отримані в процесі моделювання зі знайденим значенням коефіцієнта теплопередачі, що представлено на рис. 3.5 (суцільні червоні Т1-Т5), отримані в процесі моделювання з постійним значенням коефіцієнта теплопередачі $500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (пунктирні зелені Т1-Т5) температурні поля для випадку заливки сплаву Al3Si у форму зі сталі.

На рисунку 3.7 представлено розподіли температурних полів у виливку і формі для термопар Т1-Т5, для випадку заливки сплаву Al-7Si в металеву форму зі сталі Ст3. Позначення кривих таке саме як і для сплаву Al3Si . Розрахункові (для випадку використання температурної залежності коефіцієнта теплопередачі) та експериментальні температурні поля добре узгоджуються для більшості термопар. Однак, найбільша розбіжність між розрахунковими та експериментальними температурами спостерігалася для термопар Т1, що

знаходилася за 2 мм від межі розділу злитка і форми. Різниця між змодельованими та експериментальними температурами для цієї термопарі досягала 25 °С. Для експериментальної кривої для термопарі Т4 був відзначений різкий спад на 5 °С на 180-й секунді, який міг бути спричинений зміщенням термопарі в отвір під час нагрівання форми і деформацією клею, що фіксує термопару. На графіках видно, що на всьому часовому інтервалі для термопар Т2-Т4 спостерігалися незначні розбіжності (до 15 °С) між експериментальними і розрахунковими температурами. Максимальна розбіжність між експериментальними і розрахунковими температурами у виливку для термопарі Т5, розташованої в розплаві (рисунок 3.7, термопара Т5), не перевищувала 23 °С у початковий момент часу. Водночас розбіжності між експериментальними та змодельованими температурними кривими з постійним значенням коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м²·К досягали 135 °С. Таким чином, для випадку заливки сплаву Al7Si в сталеву форму також показано, що використання постійного значення коефіцієнта теплопередачі не дає змоги отримати достовірний розподіл температури у формі та злитку під час моделювання. Особливо великі розбіжності саме для кривої охолодження, записаної під час затвердіння злитка.

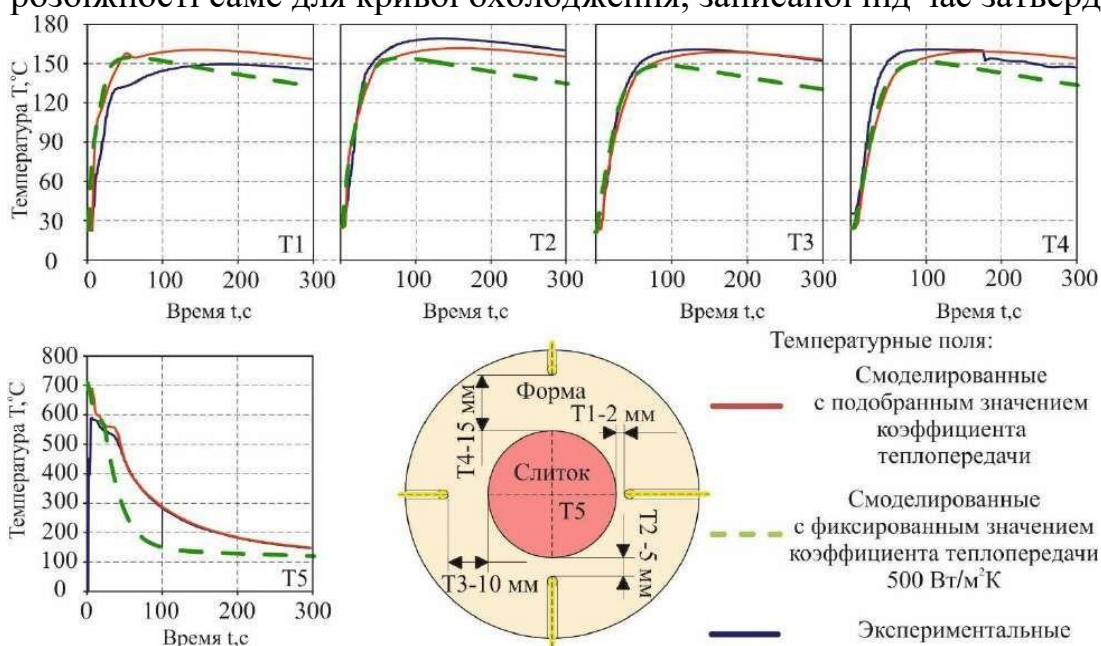


Рисунок 3.7 - Експериментальні (суцільні сині Т1-Т5), отримані в процесі моделювання зі знайденим значенням коефіцієнта теплопередачі, що представлено на рис. 3.5 (суцільні червоні Т1-Т5), отримані в процесі моделювання з постійним значенням коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м²·К (пунктирні зелені Т1-Т5) температурні поля для випадку заливки сплаву Al-7Si у форму зі сталі Ст3.

На рисунку 3.8 показано експериментальні та розрахункові (для випадку використання температурної залежності коефіцієнта теплопередачі, представленої на рисунку 3.5) температурні поля, у злитку і формі для термопар Т1-Т5. На графіках видно, що для всіх термопар, встановлених у формі Т1-Т4, на всьому інтервалі часу є незначні розбіжності (до 10 °С) між експериментальними і розрахунковими температурами. Різниця між експериментальною і розрахунковою температурами у виливку для термопарі Т5, розташованої в розплаві (рисунок 3.8, термопара Т5), не перевищує 30 °С. Розбіжності між експериментальними та змодельованими з фіксованим значенням коефіцієнта теплопередачі температурними залежностями складо

до 24 °С для термопар Т1-Т4 і до 150 °С для термопар Т5. Можна зробити висновок про те, що використання постійного значення коефіцієнта теплопередачі не дає змоги отримати достовірний розподіл температури у формі та злитку, і необхідно експериментально визначати залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливки (злитка), якщо необхідно отримати достовірний розподіл температур, особливо для злитка.

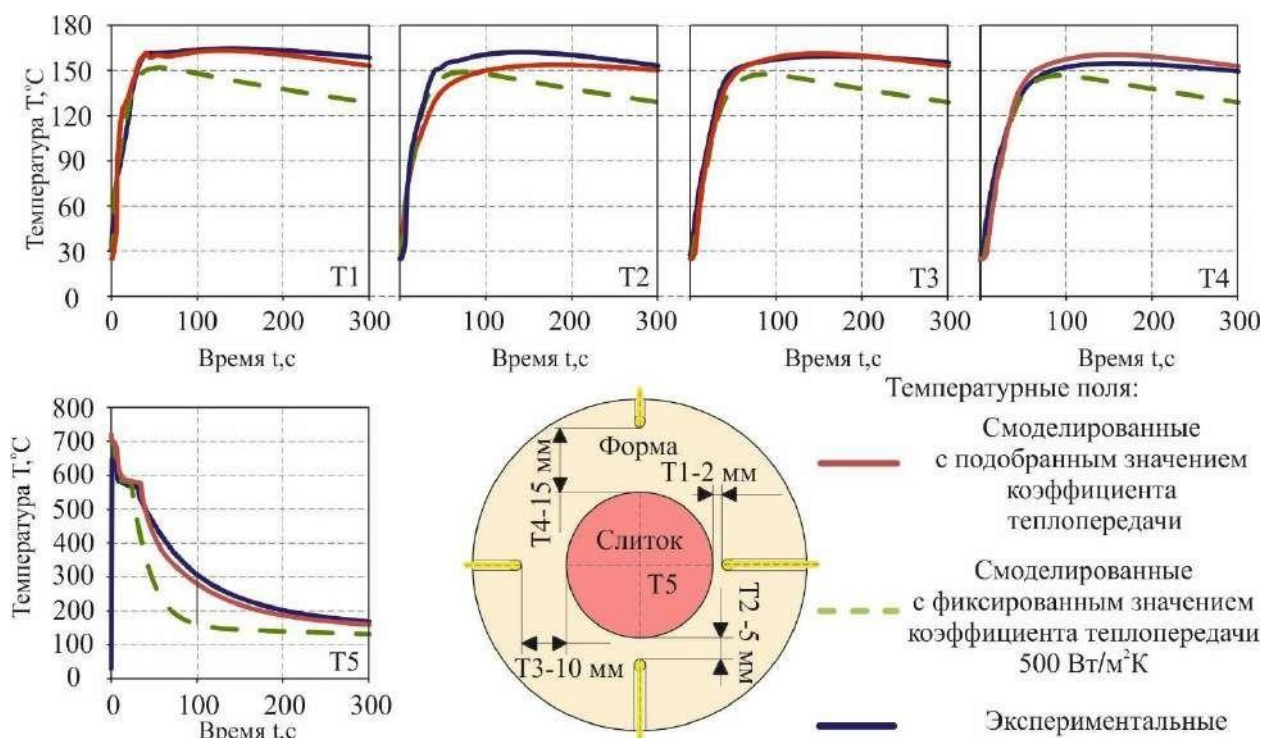


Рисунок 3.8 - Експериментальні (суцільні сині Т1-Т5), отримані в процесі моделювання зі знайденим значенням коефіцієнта теплопередачі, що представлено на мал. 30 (суцільні червоні Т1-Т5), отримані в процесі моделювання з постійним значенням коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м²·К (пунктирні зелені Т1-Т5) температурні поля для випадку заливки сплаву Al-12Si у форму зі сталі Ст3.

3.3. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання різних сплавів у форму з графіту

Визначали коефіцієнт теплопередачі між злитками зі сплавів Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si, A99, і формою з графіту. Так само визначали коефіцієнт теплопередачі між елементами графітової форми номер 1 (графіт-графіт). Його задавали при моделюванні у вигляді постійної величини в інтервалі від 500 до 1500 Вт/(м² К) з кроком 100 Вт/(м² К). Коефіцієнт теплопередачі графіт-графіт визначали, ґрунтуючись на показаннях термопар Т10, розташованої в частині форми IV (рисунок 2.2). Ця частина форми безпосередньо не контактує з розплавом, і її нагрівання відбувається через передачу тепла від частини форми III через межу розділу форма-форма (графіт-графіт). Значення коефіцієнта теплопередачі між елементами форми, для якого величина функції помилок t_{Err} виявилася мінімальною, становило 1000 Вт/(м² К).

3.3.1. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі під час заливання чистого алюмінію марки А99 у форму з графіту

Графік залежності коефіцієнта теплопередачі від часу, що минув від початку заливки, представлений на рисунку 3.9. Максимальні зміни величини коефіцієнта теплопередачі (h) відбуваються в початковий період після заливки розплаву, тому пошук коефіцієнтів теплопередачі проводили в інтервалі часу від 2 до 9 секунд при кроці 1 секунда. Далі крок був збільшений, і значення коефіцієнта теплопередачі (h) визначали для часу, що дорівнює 20, 30, 40, 60, 120, 180, 240 і 300 секунд. Проміжні значення між отриманими точками, для яких проводили пошук величини коефіцієнта теплопередачі, задавали лінійною залежністю.

Було виявлено, що розрахунковий час повного затвердіння виливка склав 20 секунд. Це значно менше, ніж час повного затвердіння, зафіксований візуально за зникненням останніх крапель рідини в усадочній раковині. За результатами 4-х експериментальних заливок середній час затвердіння склав 37 секунд. Щоб домогтися збігу експериментального часу затвердіння з отриманим у процесі моделювання, змінили підхід до визначення оптимального значення коефіцієнта теплопередачі для кожного часового кроку. Для перших 40 секунд моделювання підбирали величину коефіцієнта теплопередачі h так, щоб значення функції помилок $t_{\text{ЕГ}}$ було якомога меншим для термопари Т5, яка знаходиться в порожнині форми приблизно по осі злитка. Час затвердіння злитка, отриманий у моделюванні з урахуванням цієї умови, становив 30 секунд. Середня величина функції помилок $t_{\text{ЕГ}}$, при моделюванні процесу заповнення і затвердіння від 0 до 300 секунд, склала 13,4 °С.

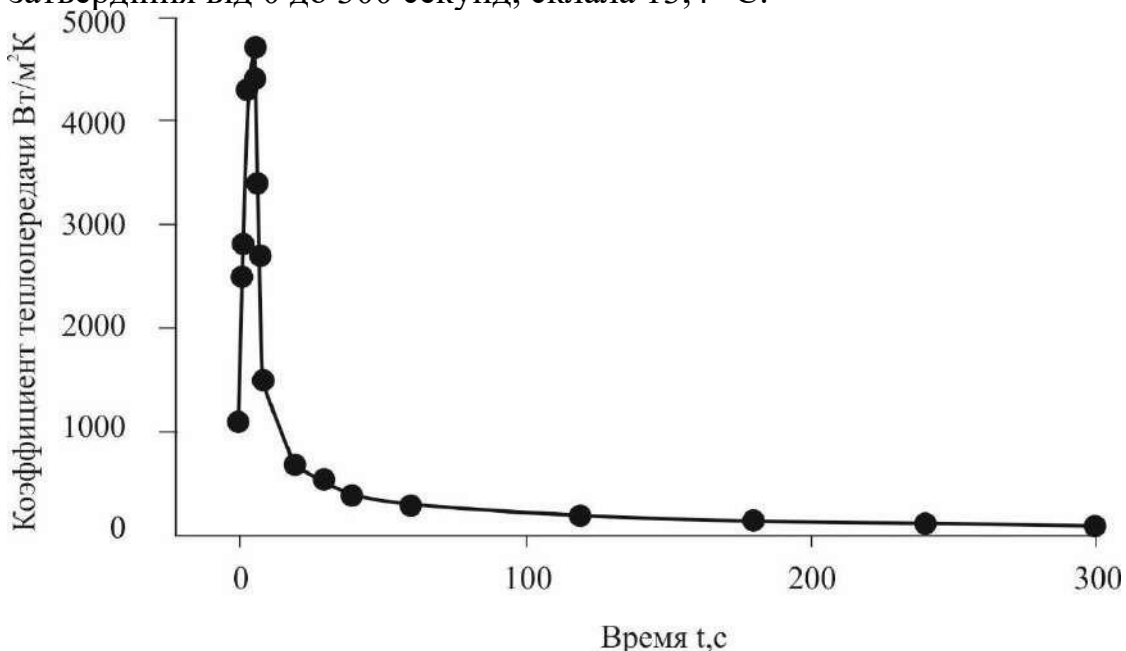


Рисунок 3.9 - Залежність коефіцієнта теплопередачі від часу, що минув від початку заливання виливки з алюмінію А99 під час заливання у форму з графіту

На рисунку 3.10 представлено графік залежності коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні злитка. Встановлено, що при температурах розплаву від початку заливки (1000 °С) до температури плавлення

алюмінію коефіцієнт теплопередачі зростає. Максимальна величина коефіцієнта теплопередачі, що склала 4700 Вт/(м² К), досягається при температурі поверхні виливки 660 °С. Далі, через збільшення зазору між виливком і формою, коефіцієнт теплопередачі знижується і при температурі 618 °С становить 700 Вт/(м² -К); при зменшенні температури поверхні виливка до 190 °С величина коефіцієнта теплопередачі змінюється до 100 Вт/(м² -К). Слід зазначити, що значення функції помилок, обчислене під час моделювання процесу заповнення і затвердіння виливки за допомогою температурної залежності коефіцієнта теплопередачі, становило 10,8 °С, що менше, ніж у разі використання його часової залежності (13,4 °С). Це пов'язано з тим, що температура поверхні злитка неоднакова в місцях розташування термопар верхнього і нижнього рівнів. Отже, і коефіцієнт теплопередачі для цих ділянок має бути різним. У разі застосування в розрахунках залежності коефіцієнта теплопередачі від часу цього врахувати не можна.

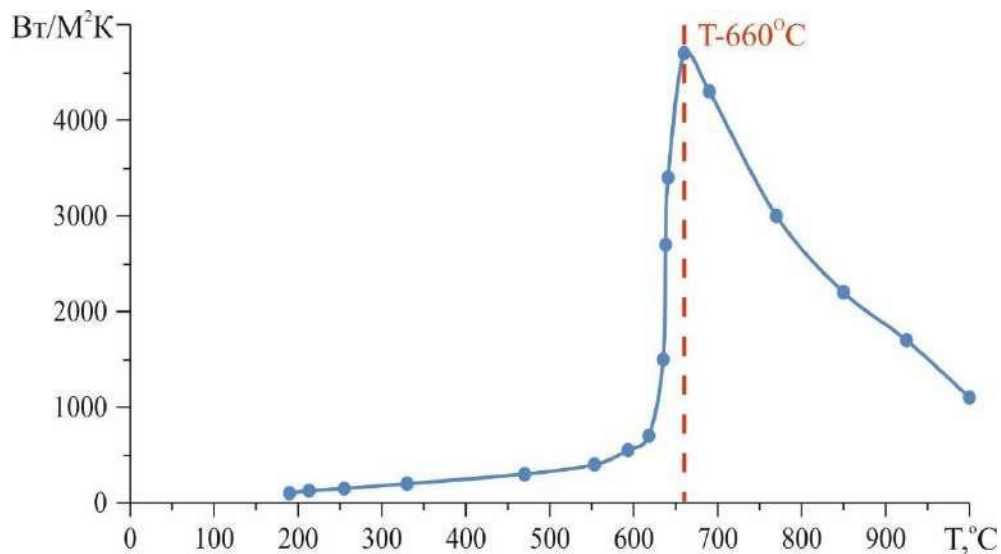


Рисунок 3.10 - Залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні злитка для чистого алюмінію А99 під час заливання у форму з графіту

На рисунок 3.11 представлено результати зіставлення експериментальних (сині суцільні лінії) і розрахункових (червоні штрихові лінії), отриманих під час моделювання процесу заповнення та затвердіння злитка з використання значень коефіцієнта теплопередачі, що представлені на мал. 37, графіків зміни температури залежно від часу, що минув від початку заливки, для термопар Т1 - Т10. На графіках видно, що в інтервалі часу від 3 до 30 секунд є значні розбіжності (до 60 °С) між експериментальними і розрахунковими кривими для термопар Т1, Т4, Т6. Це пов'язано з тим, що під час підбору значень коефіцієнта теплопередачі прагнули досягти максимального збігу розподілів температури для термопар, встановленої у виливку (термопара Т5) та отриманого шляхом моделювання, і часу затвердіння виливку. Різниця між експериментальною і розрахунковою температурами у виливку (рисунок 3.11 термопара Т5) не перевищує 20 °С. Після закінчення 30 секунд розбіжність між отриманим шляхом моделювання та експериментальним розподілами температур у формі

не перевищує 20 °С для всіх термопар. Зіставлення розрахункових і експериментальних температур у формі та виливку в інтервалі часу від 100 до 300 секунд не показано, оскільки при досягненні 100 секунд, різниця між цими температурами залишається практично постійною і не перевищує 20 °С.

Як було зазначено раніше, термопара Т10 дає змогу визначити коефіцієнт теплопередачі форма-форма (графіт-графіт), оскільки частина форми, де була встановлена термопара, не контактувала з розплавом. Різниця між розрахунковим і експериментальним розподілами температури на цій термопарі не перевищує 3 °С.

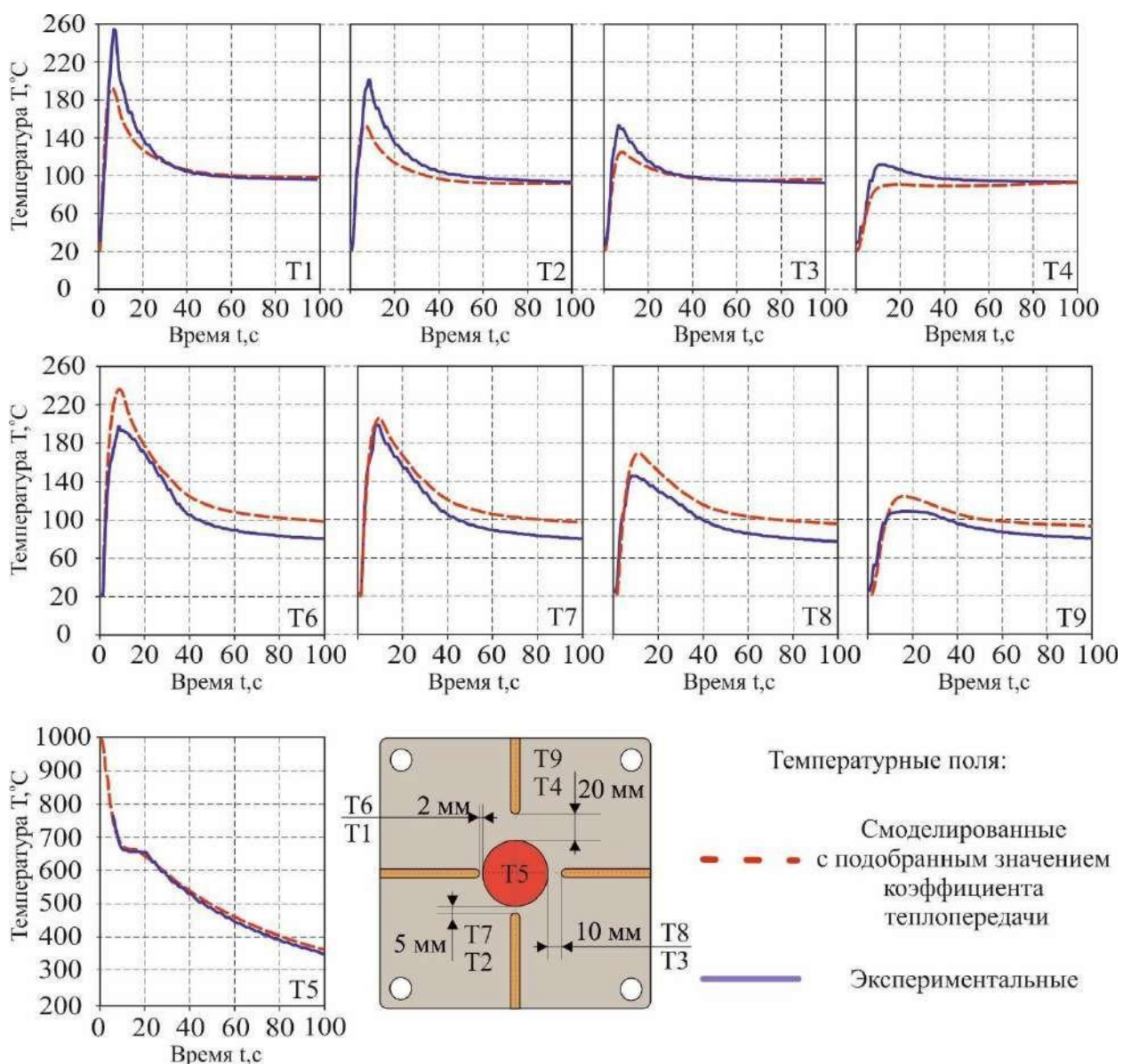


Рисунок 3.11 - Експериментальні (суцільні сині Т1-Т9), отримані в процесі моделювання з коефіцієнтом теплопередачі представленим на рис. 3.10 (штрихові червоні Т1-Т9), температурні поля для випадку заливки сплаву А99 у форму з графіту номер 1.

3.3.2. Результати визначення коефіцієнта теплопередачі при заливці сплавів на основі Al-Si у форму з графіту

На рисунку 3.12 представлені графіки залежності коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні злитків зі сплавів Al-3Si (а), Al-7Si (б) і Al-12Si (в), які заливають у форму з графіту. Так само на графіках, для кожного сплаву нанесено криву зміни частки твердої фази. Як можна бачити з рис. 3.12, криві залежності значень коефіцієнта теплопередачі від температури різняться для всіх трьох сплавів.

Для сплаву Al-3Si можна бачити, що в інтервалі від температури заливки ($720\text{ }^{\circ}\text{C}$) до температури ліквідусу сплаву ($T_L = 642\text{ }^{\circ}\text{C}$) значення коефіцієнта теплопередачі підвищується до $2650\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$. При T_L на графіку (рисунок 3.12) утворюється невеликий майданчик, що збігається з первинною кристалізацією алюмінієвого твердого розчину. Така поведінка кривої зміни коефіцієнта теплопередачі від температури виглядає дивною. Річ у тім, що для раніше розглянутих кривих характерна близькість максимального значення коефіцієнта теплопередачі до температури ліквідусу сплаву. Тут же максимальне значення ($4500\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$) досягається за температури, нижчої за температуру солідусу сплаву. Очевидно, отримана крива не зовсім достовірна. Водночас, судячи з кривої зміни коефіцієнта теплопередачі для сплаву Al-7Si, за температури ліквідусу сплаву (T_L) $612\text{ }^{\circ}\text{C}$ коефіцієнт теплопередачі досягає максимального значення і становить $4700\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$, що дуже схоже на результати визначення коефіцієнта теплопередачі для сплавів Al-Si під час заливання у форму зі сталі. Значення коефіцієнта теплопередачі для сплаву Al-12Si при температурі ліквідусу (T_L) $589\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить $3076\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$. Раніше вже вказувалося, що реальна температура ліквідусу для сплаву Al-12Si може значно відрізнитися від розрахункової, а частка первинних кристалів дуже мала. Тому фактично для цього сплаву ліквідус і солідус збігається при $576\text{ }^{\circ}\text{C}$ і цій температурі відповідає максимальне значення коефіцієнта теплопередачі ($4500\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$).

Значення коефіцієнта теплопередачі при температурі солідусу для сплавів Al-3Si, Al-7Si і Al-12Si при температурах $576\text{ }^{\circ}\text{C}$, $552\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $576\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно, становить $3900\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$, $2500\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$ і $3186\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$. Тобто навіть після повного затвердіння значення коефіцієнта теплопередачі досить високе.

Вивчаючи максимальні значення коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою, було виявлено, що для сплаву Al-12Si на кривій залежності коефіцієнта теплопередачі спостерігається різкий стрибок в інтервалі від температури солідусу (T_S) до температури поверхні виливка ($568\text{ }^{\circ}\text{C}$), за цієї температури спостерігається максимальне значення коефіцієнта теплопередачі, що становить $4500\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$. Така ж саме поведінка спостерігається і для сплаву Al-3Si, у якого від температури солідусу сплаву до температури поверхні виливки $535\text{ }^{\circ}\text{C}$ значення коефіцієнта теплопередачі зростає до $4500\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$. На відміну від сплавів Al-12Si і Al-3Si, у Al-7Si максимальне значення коефіцієнта теплопередачі спостерігається за температури ліквідусу сплаву (T_L) і становить $4700\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$. Як можна бачити, максимальні значення коефіцієнта теплопередачі для всіх досліджених сплавів Al-Si близькі.

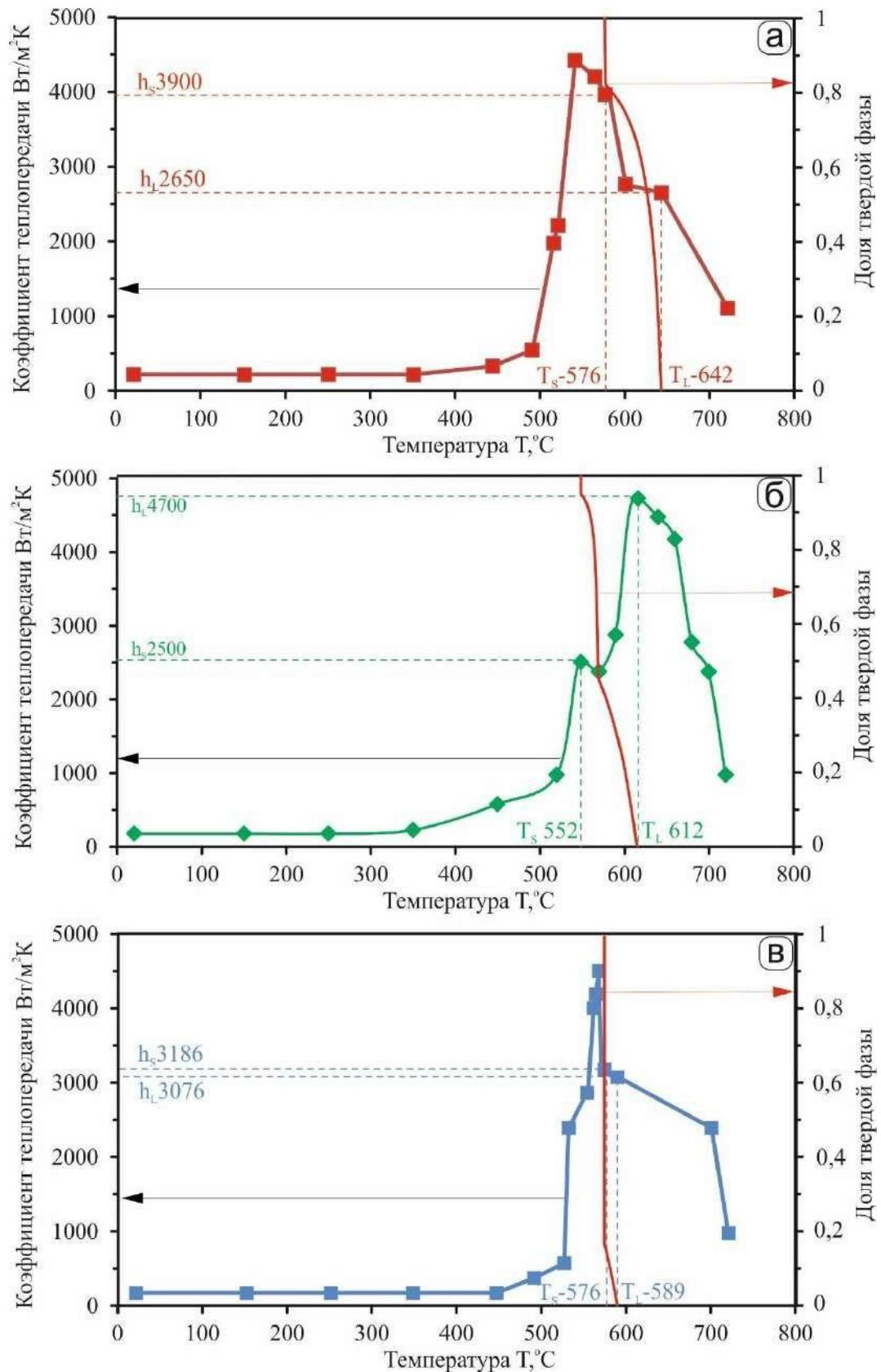


Рисунок 3.12 - Графіки залежності коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні виливки і частки твердої фази для сплавів Al₃Si(а), Al-7Si(б), Al-12Si(в) під час заливання у форму з графіту.

На рисунку 3.13 представлено результати зіставлення експериментальних (сині лінії), розрахункових з використанням знайденої кривої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури (рис. 3.12) (червоні пунктирні лінії) та розрахункових з постійним значенням коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/(м²

К) (зелені суцільні лінії), отриманих під час моделювання процесу заповнення та затвердіння зливка зі сплаву Al-3Si, графіків зміни температури залежно від часу, що пройшов від початку заливання, для термопар T1 - T5.

На графіках видно, що для всього інтервалу часу є незначні розбіжності до 17 °С між експериментальними і розрахунковими температурами для термопар T1, T3, T4. На графіках видно, що значні розбіжності (до 100 °С) спостерігаються між експериментальними і розрахунковими значеннями для термопар T2. Різниця між експериментальними і розрахунковими температурами у виливку для термопар, розташованої в розплаві (рисунок 3.13, термопара T5), не перевищує 38 °С. Максимальна розбіжність між експериментальними та розрахунковими (з використанням фіксованого значення коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м² · К) температурними залежностями становило 45 °С для термопар розташованих у формі T1-T4 і 217 °С для термопар T5, розташованої у виливку.

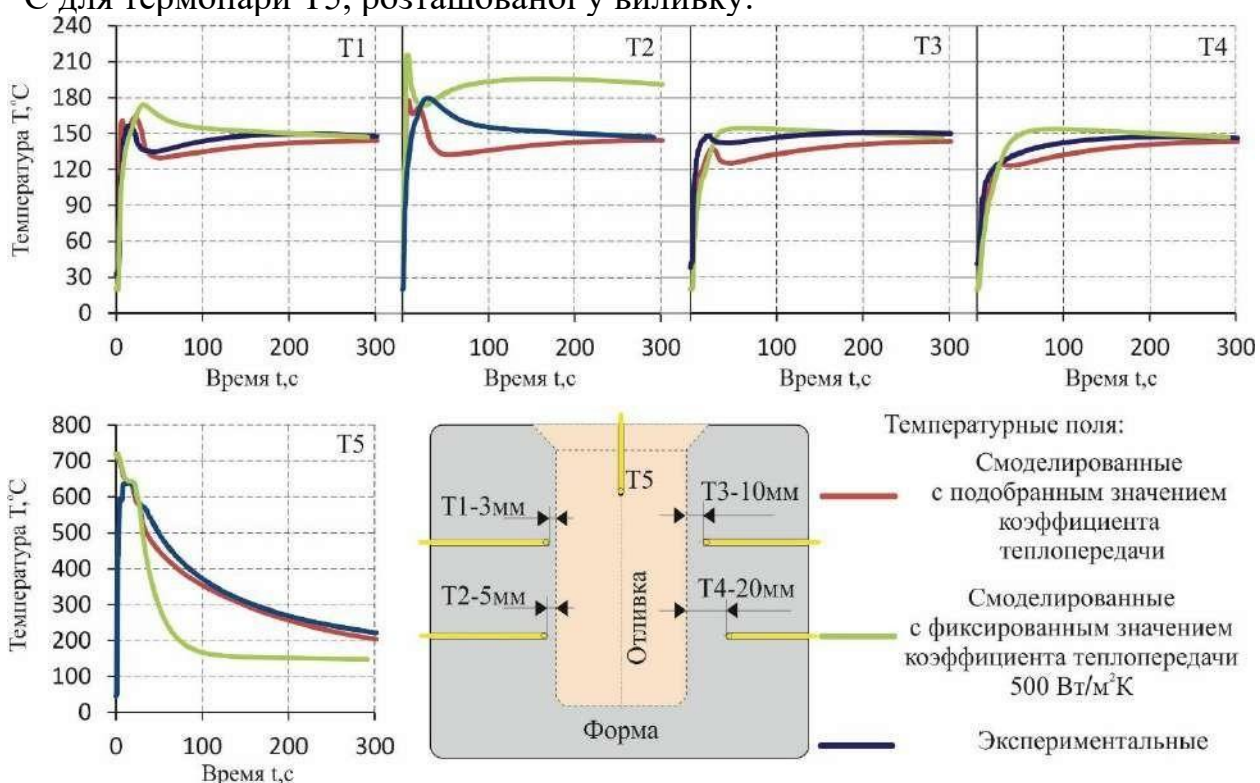


Рисунок 3.13 - Експериментальні (сині лінії), отримані в процесі моделювання з використанням знайденої кривої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури (рис. 3.12) (червоні лінії) та отримані в процесі моделювання з постійним значенням коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м² · К (зелені лінії) температурні поля для сплаву Al-3Si, який заливається у форму з графіту номер 2.

На рисунку 3.14 представлено результати зіставлення експериментальних (сині суцільні лінії), розрахункових з використанням знайденої кривої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури (рис. 3.12) (червоні штрихові лінії) та отриманих під час моделювання процесу заповнення й затвердіння виливка, графіків зміни температури залежно від часу, що пройшов від початку заливання, для термопар T1 - T10 для сплаву Al-7Si, який заливають у графітову форму. На графіках видно, що в інтервалі часу від 3 до 40 секунд є значні розбіжності (до 100 °С) між експериментальними та розрахунковими

кривими для термопар T1, T6, T7, T8. Це пов'язано з тим, що під час підбору значень коефіцієнта теплопередачі прагнули досягти максимального збігу експериментального й отриманого шляхом моделювання розподілів температури у виливку (термопара T5) і часу затвердіння виливку. Різниця між експериментальною і розрахунковою температурами у виливку (рисунок 3.14, термопара T5) не перевищує 15 °С. Після закінчення 40 секунд розбіжність між отриманим шляхом моделювання та експериментальним розподілами температур у формі не перевищує 20 °С для всіх термопар.

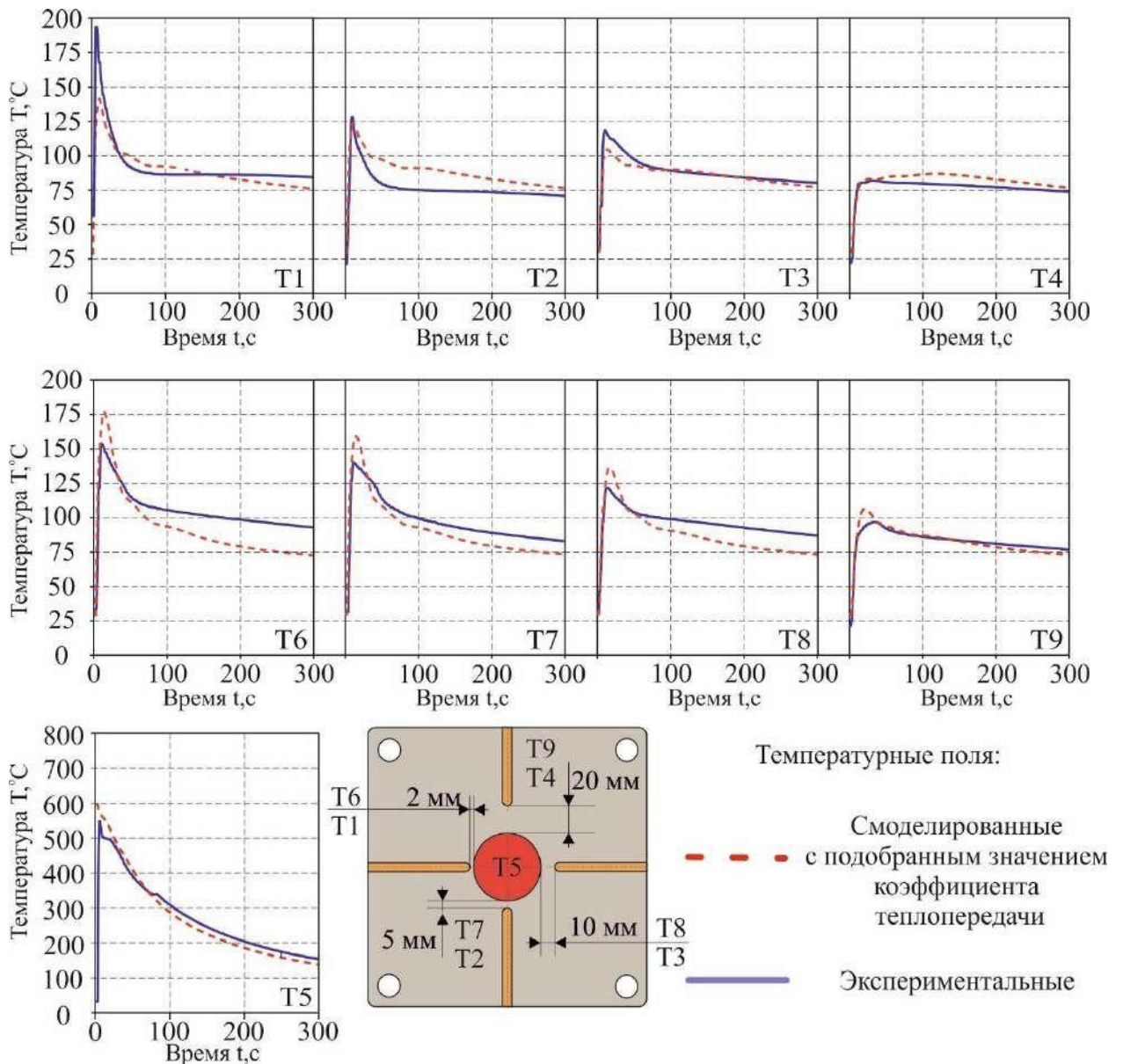


Рисунок 3.14 - Експериментальні (суцільні сині), отримані в процесі моделювання (штрихові червоні) значення температури в точках установлення термопар (T1-T9) для сплаву Al-7Si, що заливається у форму з графіту номер 1.

Експеримент зі сплавом Al-12Si проводили з використанням другої графітової форми. На рисунку 3.15 представлено результати зіставлення експериментальних (сині лінії), розрахункових з використанням знайденої кривої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури (рис. 3.12) (червоні лінії) і розрахункових з фіксованим значенням коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м² К (зелені лінії), отриманих під час моделювання

процесу заповнення та затвердіння зливка, графіків зміни температури залежно від часу, що пройшов від початку заливання, для термопар T1 - T5.

На графіках видно, що на всьому інтервалі часу є незначні розбіжності до 15 °С між експериментальними та розрахунковими кривими для термопар T1-T4. Це пов'язано з тим, що під час підбору значень коефіцієнта теплопередачі намагалися досягти максимального збігу експериментального й отриманого шляхом моделювання розподілів температури у виливку (термопара T5) і часу затвердіння виливку. Так само на графіках видно, що значні розбіжності до (50 °С) є між експериментальними та розрахованими з фіксованим значенням коефіцієнта теплопередачі температурними залежностями від часу для термопар T1-T4. Різниця між експериментальною та розрахунковою з використанням знайденої кривої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури (рис. 3.12) температурами у виливку для термопари, що розташована в розплаві (рисунок 3.15, термопара T5), не перевищує 10 °С. У разі ж використання фіксованого значення коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м² К розбіжність між експериментальними і розрахованими температурними кривими досягає 220 °С.

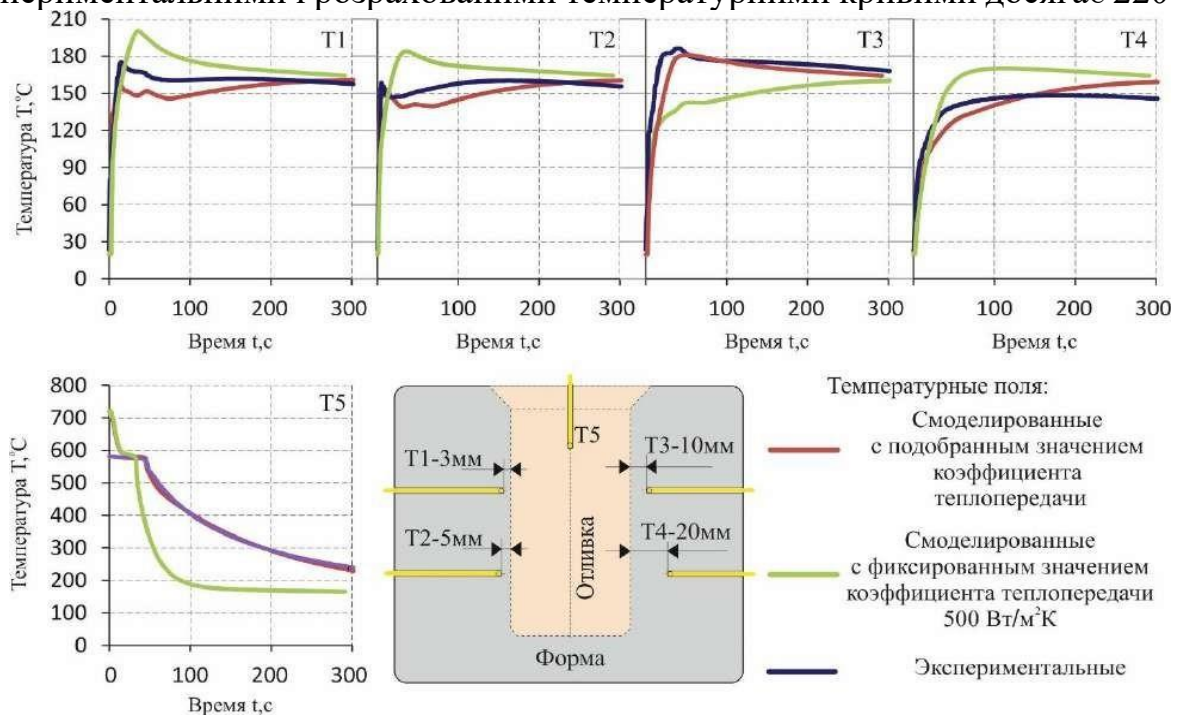


Рисунок 3.15 - Експериментальні (сині лінії), отримані в процесі моделювання з використанням знайденої кривої залежності коефіцієнта теплопередачі від температури (рис. 3.12) (червоні лінії) та отримані в процесі моделювання з постійним значенням коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м² ·К (зелені лінії) значення температур у точках установлення термопар T1-T5 для сплаву Al-12Si, що заливається у форму з графіту номер 2.

Можна бачити, що, як і в разі заливання сплавів у сталеву форму, використання постійного значення коефіцієнта теплопередачі 500 Вт/м² ·К не дає змоги отримати достовірний розподіл температури у формі, що призводить до появи значних розбіжностей при моделюванні та експерименті. Найбільші розбіжності при використанні постійного значення коефіцієнта теплопередачі спостерігаються для кривої охолодження зливка. Використання ж знайдених залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури дає змогу

значно підвищити збіжність між експериментальними та розрахунковими кривими.

3.4. Порівняння залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні зливка для форм, що забезпечують різні швидкості охолодження

3.4.1. Порівняння знайдених залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури при заливці сплаву Al-3Si у форми зі сталі та графіту

На рисунку 3.16 представлено графіки залежності коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні зливка, між виливком зі сплаву Al-3Si і формами з графіту і сталі Ст3. На графіку видно, що значення коефіцієнта теплопередачі за температури ліквідусу сплаву (T_L) 642 °C становлять 2650 Вт/м² К для графітової форми і 2320 Вт/м² К для сталевих форми. За температури солідусу сплаву (T_S) 576 °C значення коефіцієнта теплопередачі становило 3900 Вт/м² К для графітової форми і 1000 Вт/м² К для сталевих форми. Максимальні значення досягаються для сталевих та графітової форми за різних температур, для сталевих форми максимальне значення коефіцієнта теплопередачі становить 2530 Вт/м² К за температури поверхні зливка 664 °C, тобто трохи вище за температуру ліквідусу сплаву. Для графітової форми максимальне значення коефіцієнта теплопередачі становить 4500 Вт/м² К і досягається при температурі поверхні виливка 540 °C, трохи нижче за температуру солідусу сплаву.

Як було зазначено раніше, графік залежності коефіцієнта теплопередачі від температури при заливці сплаву Al-3Si у форму з графіту, очевидно, не зовсім правильний. У більшості випадків максимальне значення коефіцієнта теплопередачі спостерігається за температури ліквідусу або температури близької до неї. У цьому ж випадку неможливо обґрунтувати, чому саме за достатньої низької температури поверхні форми, коли сплав повністю затвердів, спостерігається передача тепла з максимальною інтенсивністю.

Водночас можна бачити, що нижче температури 500 °C у формах зі сталі та графіту коефіцієнт теплопередачі практично ідентичний і становить 200 Вт/м² К. Це пов'язано з тим, що нижче цієї температури між злитком і формою формується значний зазор.

Можна бачити, що максимальне значення коефіцієнта теплопередачі під час заливання сплаву Al-3Si в графітову форму в 1,8 раза вище, ніж під час заливання цього сплаву в сталеву форму.

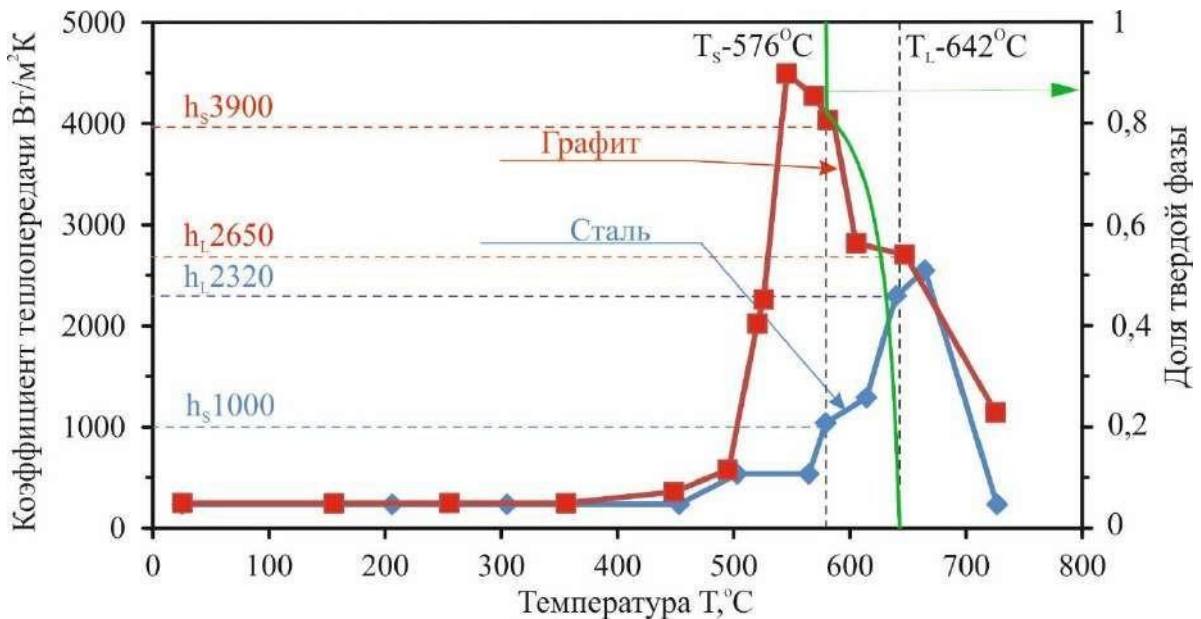


Рисунок 3.16 - Залежність коефіцієнта теплопередачі та частки твердої фази від температури поверхні зливка для сплаву Al-3Si під час заливання у форми зі сталі та графіту.

3.4.2. Порівняння знайдених залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури під час заливання сплаву Al-7Si у форми з ХТС, сталі та графіту

На рисунку 3.17 представлено залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні зливка під час заливання алюмінієвого сплаву Al-7Si у форми з ХТС, сталі та графіту. Як видно, графіки зміни коефіцієнта теплопередачі під час лиття в сталеву, графітову і форму з ХТС значно відрізняються.

Максимальне значення коефіцієнта теплопередачі між виливком і формою досягаються за температури ліквідусу T_L (612°C) для форм із ХТС і графіту, і становить 4700 Вт/м² К і 900 Вт/м² К відповідно. Для сталевій формі максимальне значення коефіцієнта теплопередачі досягається трохи вище за температуру ліквідусу сплаву 640°C, і становить 2050 Вт/(м² К). Таким чином максимальні значення коефіцієнта теплопередачі під час заливання сплаву в графітову форму більші у 2,3 раза ніж під час заливання в сталеву форму та в 5 разів, ніж під час лиття у форму з ХТС.

Значення коефіцієнта теплопередачі при температурі солідусу T_S (552°C) становить 2500 Вт/(м² К) при заливці сплаву в графітову форму, 600 Вт/(м² К) для форми з ХТС і 550 Вт/(м² К) для форми зі сталі. Таким чином при температурі солідусу значення коефіцієнта теплопередачі під час лиття сплаву Al-7Si в графітову форму приблизно в 4 рази більші, ніж під час лиття у форми з ХТС і сталі. Раніше було зазначено, що під час заливання сплаву Al7Si в графітову форму на графіку зміни коефіцієнта теплопередачі є майданчик, найімовірніше, пов'язаний з активним виділенням тепла під час евтектичного нарощення.

Коли температура поверхні виливка нижча за температуру солідусу сплаву (500 °C), різниця між коефіцієнтами теплопередачі під час лиття в

сталеву і графітову форми незначна і їх значення становить $200 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. Коефіцієнт теплопередачі між сплавом і формою з ХТС має більш високе значення, що дорівнює $600 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, але і воно зберігається до кімнатної температури. Це пов'язано з тим, що для визначення цього значення коефіцієнта теплопередачі використовували тільки 2 значення коефіцієнта теплопередачі: вище за температуру ліквідуса і нижче за температуру солідуса. Насправді можливо, що за низьких температур значення коефіцієнта теплопередачі між сплавом Al-7Si і формою з ХТС значно нижчі та близькі до значень, отриманих під час заливання сплаву у форми з графіту і сталі.

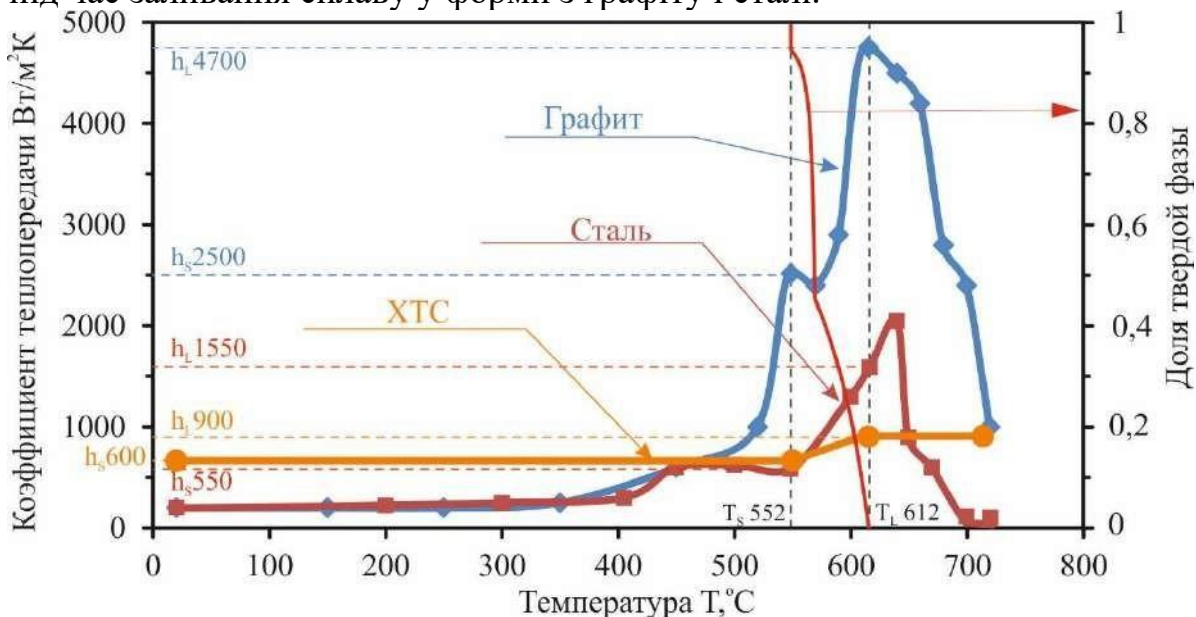


Рисунок 3.17 - Залежність коефіцієнта теплопередачі та частки твердої фази від температури поверхні злитка під час заливання алюмінієвого сплаву Al-7Si у форми з ХТС, сталі та графіту

3.4.3. Порівняння знайдених залежностей коефіцієнта теплопередачі від температури під час заливання сплавів на основі Al-12Si у форми з різною швидкістю охолодження

На рисунку 3.18 представлено залежність коефіцієнта теплопередачі від температури поверхні злитка, між сплавом Al-12Si і формами з графіту і сталі. З графіків видно, що на відміну від сплавів Al-3Si і Al-7Si максимальне значення коефіцієнта для сплаву Al-12Si досягається за однієї й тієї самої температури поверхні вилівка 570 °С і становить $4700 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ для графітової форми і $2500 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ для сталевий форми. Таким чином максимальне значення коефіцієнта теплопередачі для графітової форми в 1,8 раза більше, ніж для сталевий форми. За температури солідуса сплаву (T_s) 576 °С значення коефіцієнта теплопередачі становлять $3186 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ для графітової форми і $1500 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ для сталевий форми. Як зазначалося раніше, це пов'язано з тим, що критичні точки де відбувається різка зміна коефіцієнта теплопередачі не завжди точно збігаються з критичними температурами сплаву (ліквідусом і солідусом). Очевидно, на це впливають процеси, пов'язані з виділенням теплоти кристалізації. Також слід враховувати, що розраховані температури ліквідуса і солідуса можуть не повною мірою збігатися з експериментальними. При зменшенні температури

поверхні злитка різниця між коефіцієнтами теплопередачі графітової та сталевій форми зменшується. Нижче 350 °С графіки зміни коефіцієнта теплопередачі під час заливання сплаву Al-12Si у форми зі сталі та графіту збігаються.

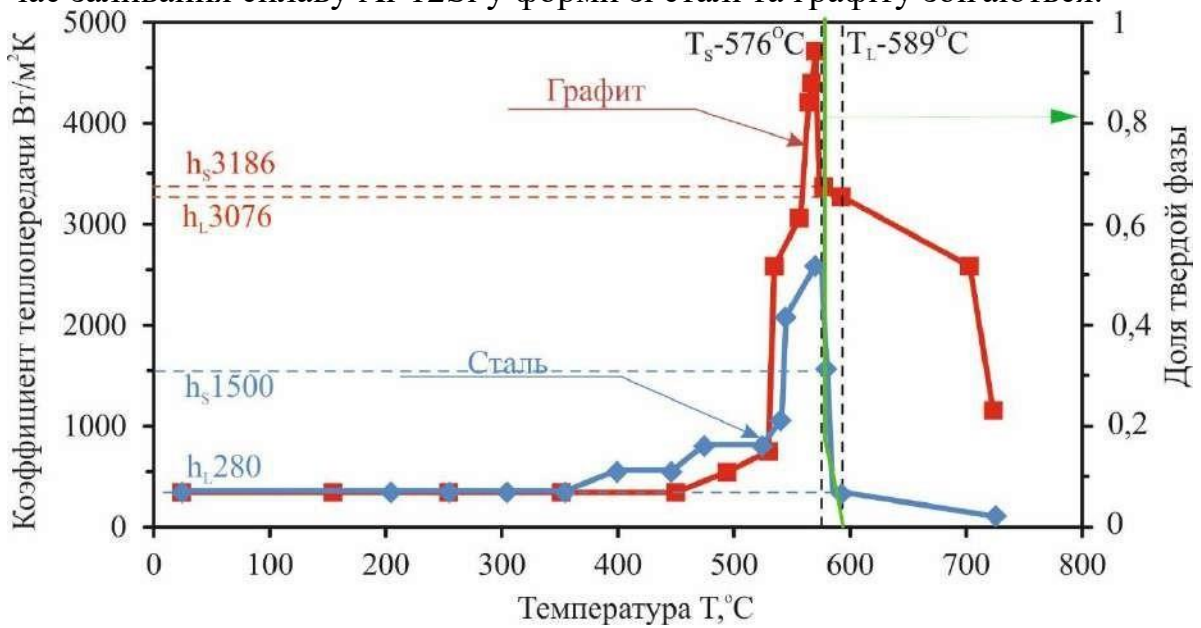


Рисунок 3.18 - Залежність коефіцієнта теплопередачі та частки твердої фази від температури поверхні злитка для сплаву Al-12Si під час заливання у форми зі сталі та графіту.

4 ЕКОНОМІЧНА РЕЗУЛЬТАТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

Аналіз техніко-економічних показників провідних компаній світу свідчить про те, що підвищення ефективності виробництва можливе лише за умови використання нових технологій, сучасного обладнання та комплексної системи ресурсозбереження. Але в складних економічних умовах, відсутності у більшості промислових підприємств вільних фінансових коштів на переозброєння, єдиною можливістю є знаходження шляхів удосконалення технологічних процесів з метою оптимізації, яка б забезпечила:

- збільшення продуктивності та виходу придатного лиття;
- покращення якості ливарної продукції;
- зменшення вартості її виготовлення.

Відомо, що економічність процесу виробництва відливок залежить від багатьох факторів: складності відливка, його маси та розмірів, складу сплаву, типу виробництва (одиничне, серійне чи масове) та способу лиття.

До важливих факторів, що впливають на техніко-економічні показники ливарного виробництва належать трудомісткість, величина припусків на механічну обробку та технічність конструкції відливки.

Також, як ми вже пересвідчилися при дослідженні теплових процесів, необхідно враховувати вибір сплаву. Порівняно з чавунними чи сталевими відливками сплави кольорових металів самі по собі вже дорогі. Для порівняння розглянули відносну вартість 1 т лиття різних сплавів (рис. 4.1). за таку відносну одиницю прийняли найдешевший тип лиття з сірого чавуну.

Таблиця 4.1 – Порівнювані відносної вартості лиття з різних сплавів

Сплави	Вартість лиття, відн. од.
Чавунні:	
сірий	1,0
високоміцний	1,1-1,3
ковкий	1,2-1,5
Стальні:	
вуглецева	1,5-2,0
легована	6,0-8,0
Мідні	6,0-8,0
Алюмінієві	8,0-10,0

При оцінюванні ефективності виготовлення лиття необхідно також враховувати і вартість матеріалів для виготовлення ливарних форм та стрижнів.

Вартість лиття також залежить від способу їх виготовлення. Більшість спеціальних способів лиття з кольорових сплавів дозволяють підвищити точність лиття, зменшити припуски на обробку, підвищити коефіцієнт використання металу, підвищити продуктивність праці за рахунок збільшення механізації та автоматизації робіт. Однак остаточне рішення про доцільність впровадження технології за обраним способом можна прийняти лише після детального розрахунку техніко-економічних показників ефективності з урахуванням характеристик номенклатури відливок та умов виробництва на конкретному підприємстві. При чому необхідно враховувати, що зі збільшенням серійності

випуску та обсягу виробництва трудомісткість та собівартість продукції зменшуються.

У структурі собівартості лиття з кольорових сплавів близько 75-80% припадає на сировину та матеріали. Перелік та кількість матеріалів для виготовлення відливок визначаються видом виливків та технологією їх виготовлення. Необхідно зазначити, що на виготовлення 1 т придатного використовується близько 6-7 т різних матеріалів (по металозавалці, формувальних сумішей та ін.).

На величину матеріаломісткості лиття впливають фактори відображені в табл. 4.2. Основні групи факторів це конструкційні, технологічні та організаційно-економічні.

Підвищення ефективності використання сировини та енергетичних ресурсів є фактором, що покращує рентабельність виробництва. Енергозбереження при цьому забезпечує підвищення ефективності основної частини технологічних операцій. Модернізація та удосконалення технологій повинні відповідати вимогами щодо сталого підвищення енергоефективності ливарного виробництва. Реалізація цієї зміни і стане можливою лише завдяки впровадженню наших пропозицій.

Таблиця 4.2. Фактори впливу на матеріаломісткість лиття з кольорових сплавів

Конструкційні		Технологічні		Організаційно-економічні	
Осучаснення конструкції	Раціональний вибір марки металу	Впровадження прогресивних процесів плавки	Методи зовнішнього впливу на рідкий та метал, що кристалізується	Розробка прогресивних нормативів	Технологічне забезпечення устаткуванням та інструментами
Збільшення потужності устаткування	Заміна дефіцитних та дорогих металів	Впровадження прогресивних процесів формовки	Впровадження точних способів лиття	Забезпечення зниження маси відливка й відповідно витрат металу	Впровадження автоматизованих систем управління за технологічним процесом
Застосування прогресивних методів розрахунку деталей	Застосування зварних деталей	Типізація або уніфікація технологічних операцій	Удосконалення технології підготовки шихтових та формувальних матеріалів	Облік та аналіз браку	Удосконалення інформаційної бази
Вибір раціональної геометрії деталей	Збільшення питомої ваги поверхні, що не потребує обробки	Обробка на технологічність	Зниження втрат металу на вигар, ливники та прибутки	Контроль якості відливок	Підвищення рівня спеціалізації
Підвищення рівня уніфікації та стандартизації деталей	Заміна складних конфігурацій деталей геометрично простими			Підвищення компетентності працівників, преміювання за економію виробничих ресурсів та часу	

Підвищення ефективності енергоспоживання є пріоритетним завданням ливарних виробництв, вирішення якого дозволяє підвищити продуктивність праці, якість продукції, оптимізувати технологію виробництва відливок на всіх етапах технологічного процесу лиття (формування, плавка, заливка розплавленого металу у форму, фінішні операції по механічній обробці виливка тощо).

Значні обсяги використання матеріально-енергетичних ресурсів, характерні для лиття виливків з кольорових сплавів, вимагають ефективного використання цих ресурсів. Це забезпечує економію і відповідно зменшення втрат ресурсів при виробництві придатного лиття. Зазначимо, що при реалізації такого лиття замовників в першу чергу цікавить питання співвідношення ціни та якості продукції.

Якщо порівняти рівень потреби у виливках з кольорових сплавів, то можна сказати, що вони посідають не останнє місце порівняно з чавунними та сталевими сплавами, а приріст питомої ваги цього лиття за останні п'ять років збільшилося більше ніж у 2 рази.

В результаті попередніх досліджень було виявлено, що мінімальну інтенсивність передачі тепла за однакової різниці температур між злитком і формою забезпечує лиття у форму з ХТС. При цьому способі лиття рівень ефективності використання тепла у 2 рази вищий, ніж під час лиття у сталеву форму, та у 4 рази ніж під час лиття у графітову форму. При цьому використання форм із холоднотвердіючих сумішей забезпечує виробництво відливок покращеної якості, що особливо важливо для покращення ефективності продажів та розширення ринку збуту.

У відповідності з табл. 4.1 серед лиття з кольорових сплавів алюмінієве є найдорожчим. Але так як більшість попереднього дослідження проводили саме для алюмінієвих сплавів, то економічну ефективність визначали на прикладі виготовлення відливок з алюмінієвого сплаву у форми ХТС. Так як дані про потребу у таких виливках на ринку у нас відсутні, ми орієнтувалися на відносну величину річного обсягу випуску придатних відливок із алюмінієвих сплавів у обсязі 1 тис. т на рік. Техніко-економічні показники визначались з урахуванням доступної інформації щодо статистичного дослідження ливарного ринку України.

Таким чином, ми виявили середньогалузеві рівні собівартості виготовлення 1 т алюмінієвих відливок та ринкову ціну. З урахуванням результатів наших досліджень очікується, що при виробництві лиття у формах з ХТС:

- підвищується вихід придатного з 63 до 80%, що означає збільшення обсягу випуску порівняно з умовною 1 тис. т продукції за базовою технологією

$$\Delta Q = 1 \times \frac{80 - 63}{63} = 0,3 \text{ тис. т};$$

- покращується якість, що впливає на рівень витрат на фінішну обробку, термін експлуатації литих виробів і відповідно на ціну реалізації.

Основні показники ефективності впровадження наших пропозицій зведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняння техніко-економічних показників виробництва виливків із мідних сплавів

Показники	Технологія		Відхилення	
	традиційна	запропонована	нат. од.	%
Брак, %	15	4	-11	-73,3
Вихід придатного литва, %	63	80	+17	+27,0
Річний об'єм виробництва, тис. т	1	1,3	+0,3	+30,0
Собівартість 1 тонни придатних виливок, грн.	64230	54595	-9635	-15,0
Ціна, грн./т	80000	85000	+5000	+6,3
Доход, тис. грн.	80	110,5	+30,5	+38,1
Загальна собівартість, тис. грн.	64,23	70,97	+6,74	+9,0
Прибуток, тис. грн.	15,77	39,53	+23,76	+150,7
Рентабельність, %	2,45	5,57	+3,12	+127,3
Економічний ефект, тис. грн./рік	23,76		-	

Висновки:

1) Основною величиною, що впливає на витрати виготовлення лиття з кольорових сплавів є вартість матеріалів. Сформувавши три групи факторів, що впливають на матеріаломісткість лиття – за конструкційними, технологічними та організаційно-економічними особливостями. Основними з них, що прямо впливають на економічний результат є: необхідність зниження витрат металу, удосконалення технології підготовки шихтових та формувальних матеріалів, постійний моніторинг за рівнем відходів і браку на всіх етапах технології та підвищення компетентності робітників задіяних у виробництві т4.

2) На основі оприлюднених статистичних даних виявили, що серед лиття з кольорових сплавів алюмінієве одне з найдорожчих. Економічну ефективність визначали на прикладі виготовлення умовної 1 тис. т відливок з алюмінієвого сплаву порівнюючи традиційну технологію та у форми з ХТС. Виявили, що перехід до запропонованого способу за рахунок зменшення кількості браку на 11% та збільшення виходу придатного на 17%, забезпечить приріст обсягу виробництва на 30%.

3) В процесі виробництва собівартість зменшиться з 64230 грн./т до 54595 грн./т. Покращення якості та збільшення тривалості експлуатації виливків може забезпечити зростання ринкової ціни на 6,3%. Доход від реалізації збільшиться на 38,1%. І навіть при збільшенні вартості всього обсягу лиття на 6,74 тис. грн. на кожен 1 тис. т продукції, можна отримати підвищення рентабельності виробництва з 2,45% до 5,57%. Загальний економічний ефект у розмірі 23,76 тис. грн. на тисячу тон лиття з кольорових сплавів підтверджує доцільність запропонованого нами удосконалення технології.

5 ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Теплові випромінювання в умовах гарячих цехів здійснюють часом вирішальний вплив на працездатність та здоров'я працівників. При сприятливих («комфортних») кліматичних умовах організм легко підтримує тепловий баланс при нормальній температурі тіла (без напруги механізму терморегуляції і без підвищення виділення поту). Параметри комфортних умов різні для різних рівнів фізичного навантаження організму.

У робітників так званих гарячих професій показники повторюваності захворювань вищі, перебіг захворювань більш важкий. Встановлено, що рівень захворюваності з тимчасовою втратою працездатності у робітників гарячих цехів на 20,9 % вищий, а індекс здоров'я на 48 % нижчий, ніж у робітників холодних цехів.

У працюючих в умовах постійних теплових навантажень виникає вітамінна недостатність (у 2-3 рази нижча фізіологічної норми), що спричиняє зниження імунобіологічної реактивності організму. У першу чергу в робітників гарячих професій розвивається вітамінна недостатність водорозчинних вітамінів (аскорбінової і ніотинової кислот, вітамінів групи В), які втрачаються організмом із потом і екстраренально. У металургів із потом виводиться до 36-48%, із сечею 17,1% необхідної добової дози аскорбінової кислоти.

У робітників основних професій металургійних виробництв втрата вологи становить 4-4,5 л за зміну, а при великих фізичних навантаженнях 5,9-7,4 л. Встановлено, що при втраті вологи більше 5 л за зміну виникають дефіцит внутрішньоклітинного калію і порушення діяльності фізіологічних систем, які регулюють водноелектролітний обмін і терморегуляцію.

Інтенсивність випромінювання залежить від температури його джерела. Потoki теплових випромінювань у гарячих цехах створюють переважно інфрачервоні промені довжиною хвилі до 10 мкм (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Характеристика теплових потоків

Джерела тепла	Температура поверхні, °С	Довжина хвилі, мкм	Спектр променів
Зовнішні поверхні печей	До 500	3,7—9,3	Довгі інфрачервоні
Внутрішні поверхні печей, нагрітий метал та ін.	До 1200	1,9—3,7	Переважно довгі, слабо видимі випромінювання
Розплавлені метали, полум'я	До 1800	1,4—1,9	Інфрачервоні і видимі
Полум'я дугових печей, зварювальних апаратів	Більше 2000	0,8—1,2	Інфрачервоні, видимі і ультрафіолетові

Тепловий ефект впливу опромінення залежить від довжини хвилі, інтенсивності потоку випромінювання, площі опромінюваної ділянки організму, тривалості опромінення та його уривчастості, кута падіння променів, одягу працівника.

Найбільшу проникаючу здатність мають червоні промені видимого спектру і короткі інфрачервоні промені (з довжиною хвилі до 1,5 мкм), які глибоко проникають у тканини і мало поглинаються поверхнею шкіри. Промені з довжиною хвилі близько 3 мкм викликають нагрівання поверхні шкіри. Внаслідок цього необхідно передбачати захист не тільки від високотемпературних, але і від низькотемпературних випромінювачів.

Ледве помітне теплове відчуття виникає вже при інтенсивності опромінення 0,08 кДж/(м²·год) при довжині хвилі 2,9 мкм або 1,7 кДж/(м²·год) при довжині хвилі 1,3 мкм. При довжині хвилі 2,9 мкм опромінення інтенсивністю 5,4 кДж/(м²·год) викликає приємне відчуття. Залежність теплового відчуття від енергії опромінення і тривалості впливу характеризується даними табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Характеристика впливу теплового випромінювання

Енергія опромінення, кДж/(м ² ·год)	Характер впливу	Переноситься при безперервному опроміненні
1—2	слабке	невизначено довго
2—3,7	помірне	3—5 хв
3,7—5,7	середнє	40—60 с
5,7—7,5	значне	20—30 с
7,5—10	високе	12—24 с
10—12,5	сильне	8—10 с
12,5	дуже сильне	2—5 с

Верхня межа оптимального опромінення може бути менше 1,25 кДж/(м²·год). Загальна кількість тепла, що поглинається тілом, залежить від величини поверхні, що випромінює. Чим більше величина такої поверхні і чим ближче до важливих життєвих органів організму працівника, тим важче результат впливу.

У виробничих умовах опромінення відкритою шкірою переноситься дещо легше внаслідок переривчастості впливу опромінення і деякого звикання до нього. Однак нерідко інтенсивність опромінення в гарячих металургійних цехах набагато перевищує переносиму організмом. Інтенсивність опромінення на різних робочих місцях при виконанні операцій коливається в широких межах (табл. 5.3).

Таблиця 5.3. Характеристика інтенсивності опромінення

Цех	Інтенсивність опромінення, МДж/(м ² ·год)
доменний	до 52,7
киснево-конверторний	» 37,6
електросталеплавильний	» 50,2
прокатний	» 37,6

Інтенсивність опромінення приблизно дорівнює, мДж/(м²·год):

$$\begin{aligned} \text{для } r \geq \sqrt{F} \quad E &= \frac{0,91 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - A \right]}{r^2} \\ \text{для } r \leq \sqrt{F} \quad E &= \frac{0,91 \cdot \sqrt{F} \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - A \right]}{r}, \end{aligned}$$

де F – площа випромінюючої поверхні, м²; r – відстань від джерела випромінювання, м; T – температура випромінюваного тіла, К; A - коефіцієнт теплозахисту, який дорівнює 110 для сукна, 85 – для людської шкіри і бавовняної тканини.

Підраховану величину інтенсивності опромінення порівнюють з допустимою.

Допустимі значення інтенсивності теплового опромінення працівників на робочих місцях з відкритими ділянками тіла не більше 25%, від джерел які нагріті:

- до темного світіння – 100 Вт/м²;
- до білого або красного світіння (розпечений або розплавлений метал, полум'я та ін.) - не більше 140 Вт/м² з обов'язковим використанням (спецодег, окуляри, щитки).

Якщо значення інтенсивності теплового опромінення працівників знаходиться у межах 140-350 Вт/м², то на постійних робочих місцях нормативну швидкість повітря необхідно збільшувати на 0,2 м/с.

При інтенсивності теплового випромінювання більше за 350 Вт/м², необхідне застосування місцевої припливної вентиляції на робочому місці (припливні душі), а працівники забезпечуються засобами індивідуального захисту (спеціальний одяг).

При проведенні ремонтних робіт у внутрішньому просторі виробничого устаткування (в печах, ковшах, регенераторах тощо) з температурою повітря до 40 С° і температурою огородження до 45С°, тривалість роботи і перерв повинні бути регламентовані.

Для запобігання порушенню водно-сольового балансу працівників гарячих цехів необхідно забезпечувати мінеральною водою та молочнокислими напоями.

Якщо значення інтенсивності опромінювання більше допустимих норм, то необхідно застосовувати заходи щодо зменшення дії випромінювання на працюючих.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТИ

1. Запропоновано й випробувано методику визначення коефіцієнта теплопередачі між сплавом і ливарною формою, що базується на зіставленні експериментальних і змодельованих із заданим значенням коефіцієнта теплопередачі температурних кривих. Зіставлення здійснюється за рахунок обчислення мінімізації функції помилок.

2. Аналіз температурних залежностей коефіцієнтів теплопередачі між алюмінієвими сплавами Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si і формами зі сталі та графіту, дозволив встановити вплив інтервалу кристалізації сплаву на вигляд температурної залежності коефіцієнта теплопередачі. Зокрема, для всіх випадків характерне досягнення максимального значення коефіцієнта теплопередачі за температури поверхні злитка поблизу температури ліквідусу сплаву, далі в міру затвердіння і формування зазору між злитком і формою значення коефіцієнта теплопередачі знижувалося.

3. Показано, що за температури поверхні злитка, нижчої за температуру солідусу сплаву, значення коефіцієнта теплопередачі практично постійне для всіх сплавів.

4. Під час лиття алюмінієвих і магнієвих сплавів у форми з графіту сталі та холоднотвердіючої суміші максимальні значення коефіцієнтів теплопередачі перебувають у діапазонах 900-1200, 2000-2500 і 4500-4700 Вт/м²К, відповідно. Таким чином максимальна інтенсивність передачі тепла за однакової різниці температур між злитком і формою під час лиття у форму з ХТС у 2 рази нижча, ніж під час лиття у сталеву форму, і у 4 рази нижча, ніж під час лиття у графітову.

5. Виявлено, що максимальні значення коефіцієнтів теплопередачі під час лиття різних сплавів у форму з одного й того самого матеріалу практично не змінюється. Змінюється тільки вид кривої залежно від температурного інтервалу кристалізації сплаву.

6. Показано, що використання значень коефіцієнтів теплопередачі, визначених у роботі, підвищує адекватність моделювання ливарних процесів. Запропоновано використовувати температурні залежності коефіцієнтів теплопередачі для задач моделювання ливарних процесів, що дасть змогу достовірно прогнозувати утворення недоливів, усадочних дефектів і термічних напружень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ