

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра: „Матеріалознавство та ливарне виробництво”

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр Кузик

“ _____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему:

“Дослідження теплового стану виливка
“Кришка передня” в піщано-глинистій
формі і розрахунок технологічних
показників лиття”

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи ПМ-22М-1

спеціальності 131 – «Прикладна механіка»

_____ Кравченко С.С.

“ _____ ” _____ 2024 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____ Віктор Ломакін

“ _____ ” _____ 2024 р.

Рецензент _____

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет _____ механіко-технологічний
Кафедра _____ матеріалознавства та ливарного виробництва
Рівень вищої освіти _____ магістр
Галузь знань _____ прикладна механіка
Спеціальність _____ 131 – Прикладна механіка
Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма
_____ 131 – Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри

“ _____ ” _____ 2024 р.

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

_____ Кравченка Сергія Сергійовича

прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: “Дослідження теплового стану виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі і розрахунок технологічних показників лиття”, затверджена наказом по університету вересня 2023 р., № _____
2. Керівник роботи: Ломакін Віктор Миколайович, к.т.н., доцент
3. Строк подання роботи до захисту: 17.01.2024 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: вивчити і дослідити процес затвердіння і охолодження виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі; розробити технологію лиття виливка “Кришка передня”; розрахувати час і середню швидкість затвердіння виливка; визначити тривалість витримки виливка у формі до температури вибивки.

5. Консультанти по роботі із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Огляд сучасного стану теорії затвердіння ливарних сплавів	Ломакін В. М.		
Розрахунки по технологічній частині	Ломакін В. М.		
Креслення по технологічній частині	Ломакін В. М.		
Спеціальний розділ	Ломакін В. М.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд сучасного стану теорії затвердіння ливарних сплавів		
2.	Розрахунки по технологічній частині		
3.	Креслення по технологічній частині		
4.	Спеціальний розділ		
5.	Оформлення пояснювальної записки		
6.	Оформлення рецензії		
7.	Захист кваліфікаційної роботи		

Дата видачі завдання:

“ ” 2023 р.

Підпис керівника

Ломакін В. М.
(прізвище та ініціали)

Підпис здобувача

Кравченко С. С.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

стор. 60, рис. 6, табл. 3, бібліографічних назв 21

ВИЛИВОК, СІРИЙ ЧАВУН, ЕЛЕКТРОПІЧ, ПЛАВКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ТЕПЛОВИЙ СТАН, ЗАТВЕРДІННЯ, КІНЕТИКА, ЧАС ЗАТВЕРДІННЯ, ШВИДКІСТЬ ЗАТВЕРДІННЯ

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти складається із трьох розділів.

В першому розділі роботи розглянуто сучасний стан теорії затвердіння виливків. Показано і порівняно фізичні способи дослідження затвердіння виливків. Обґрунтовано застосування математичного моделювання при таких дослідженнях. Проаналізовано вплив кінетики кристалізації на структуроутворення в литому чавунному виробі. Наведено особливості послідовної і об'ємної кристалізації ливарних сплавів. Сформульовано мету і задачі дослідження на прикладі виливка “Кришка передня”.

В технологічному розділі роботи розроблена технологія виготовлення виливка “Кришка передня” на комплексній автоматичній лінії типу Л22821.

В третьому, науковому, розділі магістерської роботи досліджено тепловий стан виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі. На підставі теорії затвердіння напівнескінченного тіла і закону “квадратного кореня” та теорії затвердіння виливків по А.Й. Вейніку, про параболічний розподіл температури у виливку і ливарній формі, виконано порівняльний розрахунок теплових і технологічних параметрів лиття. Зазначена можливість оптимізації технологічного процесу виготовлення литих виробів.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	7
Розділ 1. Огляд сучасного стану теорії затвердіння ливарних сплавів	8
1.1. Загальні аспекти теорії	8
1.2. Фізичні способи дослідження затвердіння виливків	9
1.3. Математичне моделювання при дослідженні затвердіння виливків ..	12
1.4. Послідовна і об'ємна кристалізація сплавів	13
1.5. Вплив кінетики затвердіння на структуроутворення в литому чавунному виробі	14
Розділ 2. Технологія лиття виливка “Кришка передня”	17
2.1. Аналіз конструкції деталі і технічних умов на виливок “Кришка передня”	17
2.2. Розробка технологічного процесу виготовлення виливка “Кришка передня”	17
2.2.1. Вибір обладнання для виготовлення ливарних форм та стрижнів	17
2.2.2. Визначення положення виливка у формі	19
2.2.3. Вибір припусків на механічну обробку і усадку, радіусів галтелей і формувальних кутів, розмірів стрижнів та стрижневих знаків	19
2.3. Розрахунок та конструювання ливниково-живильної системи	20
2.3.1. Визначення габаритних розмірів опоки	20
2.3.2. Визначення оптимальної тривалості заливки	21
2.3.3. Визначення площ перерізу каналів ливникової системи	22
2.4. Опис технологічного процесу виготовлення виливка	25
2.4.1. Вибір формувальної та стрижневої суміші	25
2.4.2. Формовка	26
2.4.3. Збирання форм	27
2.4.4. Заливка форм	27
2.4.5. Вибивка і обрубка	27

2.5. Опис процесу проектування ливарної оснастки	28
Розділ 3. Дослідження теплового стану виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі.....	30
3.1. Аналіз теплових умов формування виливка “Кришка передня”	30
3.2. Математичне формулювання задачі затвердіння виливка “Кришка передня”	33
3.3. Розрахунок теплових і технологічних параметрів лиття для виливка “Кришка передня”	37
3.4. Порівняльний розрахунок теплових і технологічних параметрів лиття для виливка “Кришка передня”	44
3.5. Результати розрахунків	50
3.5.1. Результати розрахунків за законом “квадратного кореня” ...	51
3.5.2. Результати розрахунків за теорією затвердіння А.Й. Вейніка	
3.5.2.1. Час і швидкість затвердіння виливка “Кришка передня”	52
3.5.2.2. Кількість теплоти переданої виливком “Кришка передня” у ливарну форму	53
3.5.3. Тривалість охолодження виливка “Кришка передня” до температури вибивки	56
3.5.4. Час знаходження виливка “Кришка передня” в ливарній формі	57
Висновок	58
Список літератури	59
Додатки	61

ВСТУП

В сучасних умовах розвитку ливарного виробництва в Україні, вивчення процесів та параметрів, пов'язаних із затвердінням виливків, набуває важливого значення. Одним з ключових питань такого вивчення і дослідження є аналіз кінетики затвердіння виливків із сірого та високоміцного чавуну, що відкриває перспективи для подальшого розвитку ливарного виробництва в країні [1].

Виготовлення виливків із сірого та високоміцного чавуну є актуальним завданням, адже ці матеріали знаходять широке використання у виробництві автомобільної, будівельної та інших галузях промисловості. Зокрема, дослідження аспектів сучасної плавки чорних сплавів в електричних індукційних печах визначає ефективність та енергоефективність виробництва.

Механізація і автоматизація ливарних цехів стають важливим кроком у напрямку підвищення продуктивності та якості виробництва. Сучасні технології дозволяють оптимізувати виробничі процеси, зменшуючи вплив людського фактору та забезпечуючи високу точність виготовлення виливків. Теплокінетичний фактор, який визначається швидкістю охолодження та затвердіння виливка, є ключовим для структуроутворення литих виробів. Важливість цього фактору для якості і експлуатаційних характеристик чавунних виробів підкреслює необхідність подальших досліджень у цьому напрямку [2].

Варто відзначити, що дослідження кінетики затвердіння виливків є необхідним і важливим етапом у вдосконаленні технологій ливарного виробництва. Врахування та оптимізація параметрів цього процесу має велике значення для підвищення якості та конкурентоспроможності української ливарної промисловості в глобальному ринковому середовищі.

В даній магістерській роботі вивчено сучасний стан теорії затвердіння виливків, розроблена технологія виготовлення виливка “Кришка передня” на автоматичній формувальній лінії та досліджено тепловий стан виробу в піщано-глинистій формі. Сформульовано математичну задачу і розраховано кінетику і час затвердіння виливка “Кришка передня”. Зазначена можливість оптимізації гілки охолодження автоматичної формувальної лінії.

Розділ 1. Огляд сучасного стану теорії затвердіння ливарних сплавів

1.1. Загальні аспекти теорії

Ливарна промисловість є важливою галуззю виробництва, де процес затвердіння ливарних сплавів визначає якість та властивості кінцевого виробу. Сучасна теорія затвердіння сплавів вивчає ряд аспектів, включаючи теплоперенос, кристалізацію, переохолодження, відведення теплоти та вплив кінетики на структуру виробів [3].

В процесі заливки ливарного сплаву в ливарну форму виникають унікальні особливості теплопереносу. Система форми повинна ефективно відводити тепло, щоб уникнути нерівномірного затвердіння сплаву. Розробка оптимальних систем тепловідводу є ключовим етапом в гарантуванні якості виробу.

Затвердіння сплавів в інтервалі температур кристалізації визначає їхні механічні та фізичні властивості. Керування переохолодженням сплаву та відведенням теплоти перегріву та фазового перетворення є важливими аспектами для уникнення дефектів та покращення властивостей затверділого виробу.

Процес охолодження твердого виливка в формі визначає його структуру та мікроструктуру. Контроль швидкості охолодження і розробка оптимальних технік охолодження є важливими етапами для уникнення дефектів, таких як тріщини чи порожнини.

Кінетика кристалізації визначає швидкість утворення кристалів у сплаві. Швидка кристалізація може призводити до дрібнозернистих структур, тоді як повільна кристалізація може сприяти формуванню крупнозернистих структур. Розуміння цього впливу дозволяє оптимізувати процес для досягнення бажаних механічних властивостей [4].

Розвиток теорії затвердіння сплавів відбувався під впливом постійного пошуку оптимальних методів та матеріалів для ливарного виробництва. Починаючи з класичних робіт досягнень у сучасних технологіях, теорія

затвердіння постійно вдосконалюється для вирішення сучасних задач ливарного виробництва.

Сучасна теорія затвердіння ливарних сплавів враховує комплексні аспекти процесу від заливки до охолодження та впливу кінетики на структуру. Застосування цих знань дозволяє покращити якість та ефективність ливарних процесів, що визначає високу конкурентоспроможність виробництва на міжнародному ринку.

1.2. Фізичні способи дослідження затвердіння виливків

Дослідження процесу затвердіння виливка є важливою частиною ливарних технологій і дозволяє контролювати якість та властивості кінцевого виробу. Сучасні фізичні методи дослідження формування виливка можуть бути класифіковані за наступними характеристиками [5]:

-термічні методи:

Диференційна скануюча калориметрія (DSC) дозволяє виміряти теплові ефекти, пов'язані із змінами фаз під час затвердіння.

Термогравіметрія (TG) визначає зміни маси виливка під час нагрівання, що пов'язано із змінами стану;

-акустичні методи:

Акустична емісія (АЕ) дозволяє виявляти і аналізувати акустичні сигнали, які виникають під час затвердіння виливка;

-механічні методи:

Вимірювання твердості визначає ступінь твердості виливки після затвердіння.

Механічні випробування (наприклад, тягові, випробування на стиснення) дозволяють оцінити механічні властивості виливка після затвердіння;

-оптичні методи:

Мікроскопія дозволяє вивчати мікроструктуру виливка після затвердіння.

Дилатометрія – вимірює розширення або стиснення матеріалу під час затвердіння;

-електричні методи:

Електрична резистивність – зміни в електричній резистивності вказують на ступінь затвердіння виливка;

-реологічні методи:

Визначення в'язкості дозволяє вивчати зміни в'язкості виливки під час затвердіння.

Ці методи можуть використовуватися окремо або в поєднанні для отримання більш повного розуміння процесу затвердіння виливка і забезпечення високої якості кінцевого виробу.

Одним із прадавніх методів дослідження кінетики затвердіння рідких речовин, що використовувався за часів становлення теорії є **метод виливання** [6]. Основна ідея полягає в тому, щоб за різні проміжки часу перевертати ливарні форми, зливати метал, та вимірювати товщину твердої кірки, що утворюється в кожній формі. Можна вибрати рівномірні інтервали, наприклад, кожні 5 хвилин. Після кожного такого інтервалу перевертати одну з ливарних форм і зливати рідкий метал. Потім вимірювати товщину твердої кірки, яка утворилася, наприкінці кожного інтервалу. За результатами дослідження будується графік кінетики затвердіння: на осі Y (функція) відкладається товщина твердої кірки, а на осі X (аргумент) відкладається час.

Цей метод дозволяє візуалізувати і аналізувати процес затвердіння ливарного сплаву протягом часу. Графік кінетики затвердіння надає інформацію про температурний режим і швидкість затвердіння сплаву, що може бути корисним для оптимізації ливарної технології і підвищення якості виробу.

Дослідження кінетики кристалізації ливарного сплаву за допомогою **термопар** є важливою методикою для вивчення термічних процесів в реальному часі [7]. Термопара - це пристрій, що вимірює температуру, використовуючи зміну електричної напруги при з'єднанні двох провідників із

різних металів. Для дослідження кінетики кристалізації ливарного сплаву можна використовувати наступний підхід:

- вибір термопар:

Для високих температур, що зазвичай характерні для процесів ливарного виробництва, часто використовують термопары з платини та родію (тип S, R), платини та ренію (тип C), або хрому та алюмінію (тип K). При цьому, керамічні ковпачки, що використовуються для захисту гарячого спаю, привносять певну інертність показів, що треба враховувати;

- монтаж термопар:

Термопары монтується в точках інтересу в розплавлених ливарних сплавах або виливках;

- вимірювання температурних змін:

Вимірювальна система, що включає термопару, підключена до вторинних приладів, таких як осцилограф або мілівольтметр, які записують зміни напруги, пов'язані зі змінами температури в місцях розташування термопар;

- використання вторинних приладів:

Осцилограф або мілівольтметр дозволяє візуалізувати і аналізувати криву температурних змін протягом часу;

- вибір термопар для чавуну:

Для дослідження кінетики затвердіння виливки із чавуну можна використовувати термопары типу S, R або K в залежності від температурного діапазону.

Цей метод дозволяє вивчати зміни температур в реальному часі під час затвердіння ливарного сплаву і зробити прогноз стосовно структури металу та рівня фізико-механічних властивостей.

1.3. Математичне моделювання при дослідженні затвердіння виливків

Математичне формулювання теплового процесу затвердіння виливка, зазвичай, включає в себе рівняння теплопровідності та враховує різні параметри та умови, що впливають на тепловий обмін у системі [8]. Зокрема, велике значення мають початкові і граничні умови. Стосовно початкових умов, то початкова температура залитого у форму металу приймається рівною температурі заливки (металу в ковші). Початкова температура ливарної форми, у випадку лиття в піщано-глинисту форму, приймається рівною температурі повітря в цеху. Граничні умови більш різноманітні. Це може бути умова симетричного охолодження (або нагрівання) металу, або умова теплової ізоляції. Частіше за все використовуються граничні умови третього і четвертого роду. Третього – для випадку конвективного теплообміну, а четвертого роду за умови наявності суцільного контакту між тілами з різними або однаковими теплофізичними характеристиками. Так, на границі між виливком і піщаною ливарною формою доцільно призначати граничну умову четвертого роду, а на зовнішній поверхні ливарної форми, що омивається оточуючим повітря – граничну умову третього роду.

Методи розв'язання таких задач досить різноманітні. Це можуть бути аналітичні методи (метод розділення змінних, метод невизначених коефіцієнтів), чисельні методи: метод скінченних різниць (МСР), явний і неявний, метод скінченних елементів (МСЕ), метод кінцевих об'ємів (МКО) [9]. Метод скінчених елементів використовується для чисельного моделювання теплових процесів у складних геометричних формах.

Крім всього зазначеного відкритим питанням є залежність теплофізичних коефіцієнтів матеріалу виливка і форми від температури. В переважній більшості робіт ігнорується така залежність.

Властивості і структура того чи іншого ливарного сплаву пов'язані з відповідною діаграмою стану. Для чорних сплавів це діаграма “залізо-вуглець”. Кривизна ліній ліквідусу і солідусу на такій діаграмі визначають темп

затвердіння (кристалізації) сплаву. Проте в багатьох практичних задачах такою особливістю дослідники ігнорують, приймаючи такі лінії прямими, а темп кристалізації рівномірним, що не завжди відповідає дійсності. При такому підході теплота фазового перетворення у сплаві виділяється рівномірно в інтервалі температур “ліквідус-солідус”[10].

Вибір методу залежить від конкретних умов задачі, геометрії об'єкта, обсягів обчислень та точності, яку необхідно досягти.

1.4. Послідовна і об'ємна кристалізація сплавів

Послідовна і об'ємна кристалізація є досить важливими процесами у формуванні структури ливарних сплавів.

Ливарні сплави тверднуть у визначеному температурному інтервалі, відомому як інтервал температур ліквідус-солідус. У цьому діапазоні температур сплав переходить від рідкого стану в твердий. Під час цього переходу виділяється теплота фазового перетворення.

Велике значення має переохолодження сплаву - це різниця між температурою сплаву і температурою солідуса. Воно може впливати на швидкість кристалізації та форму кристалів.

Послідовна кристалізація. У випадку невеликої різниці між температурами ліквідусу і солідуса виникає послідовна кристалізація. В такому процесі по перерізу виливка присутні усі можливі фази: тверда кірка, перехідна зона, рідкий сплав. Теплота передається зазвичай в напрямку нормалі до поверхні робочої порожнини ливарної форми.

В процесі затвердіння утворюються кристали. Кристали у центральній частині виливка можуть бути округлими та крупними. В зоні між поверхнею виливка і центральною частиною ростуть продовгуваті стовпчасті кристали. В поверхневій зоні виливка формуються округлі та мілкі кристали.

Форма кристалів залежить від ряду факторів, таких як температура, швидкість кристалізації та переохолодження. Швидше кристалізуючі області можуть мати більшу кількість дефектів та менш регулярну форму [11].

Об'ємна кристалізація. Велика різниця між температурою ліквідусу і солідусу характеризує об'ємну кристалізацію. Теплота фазового перетворення виділяється в усьому об'ємі виливка, викликаючи перехід фази з рідкого в твердий стан.

Теплота фазового перетворення виділяється з поверхні кристалів усередині виливка, що впливає на температурний режим та має важливе значення для кінцевої мікроструктури [12].

Послідовна і об'ємна кристалізація ливарних сплавів є складними процесами, які визначають структуру та властивості кінцевого виробу. Розуміння цих процесів важливе для оптимізації виробничих умов та отримання бажаних характеристик виробів з металу.

1.5. Вплив кінетики затвердіння на структуроутворення в литому чавунному виробі

Кінетика кристалізації в чавунному виливку впливає на формування мікроструктури та визначає властивості кінцевого виробу. Утворення мікроструктури в чавунному виливку визначається кількома факторами, зокрема швидкістю охолодження та швидкістю затвердіння [13]. Розглянемо умови формування мілкозернистої рівноосної макроструктури, стовпчатих кристалів у поверхневій зоні та рівновісного зерна в центральній частині виливка.

Висока швидкість охолодження сприяє утворенню мілкозернистої структури. Швидке охолодження знижує час кристалізації.

Швидке затвердіння може запобігти росту великих кристалів, створюючи більше кристалізаційних ядер.

При швидкому охолодженні можуть утворюватися стовпчасті кристали, оскільки немає достатнього часу для росту кристалів у ширину. Різниця в температурі між поверхнею форми і центральною частиною виливка сприяє утворенню такої структури.

Повільне охолодження в центральній частині виливка дозволяє кристалам рости у великі зерна. Зменшення температурного градієнту сприяє рівновісному росту кристалів.

Мілкозерниста рівновісна макроструктура часто вважається бажаною з точки зору досягнення високих механічних властивостей і має кращу ударну міцність та опір руйнуванню.

Стовпчаста макроструктура може бути бажаною для високого тепловідводу та витривалості при високих температурах.

Рівновісне зерно в центральній частині може бути доцільним для виробів, де важлива рівновага між механічною міцністю та термічною стійкістю.

Обираючи структуру, важливо враховувати конкретні вимоги виробу і оптимізувати умови ливарення для досягнення бажаного типу макро- і мікроструктури в чавунному виливку.

Швидке затвердіння може призвести до більшої кількості дрібнозернистих зон, що може підвищити механічну міцність виробу.

Повільне затвердіння може сприяти формуванню більших зерен та грубозернистої структури, що може вплинути на деякі фізичні властивості.

Збільшення вмісту вуглецю сприяє утворенню графіту.

Високий вміст вуглецю може призводити до великої кількості графітових включень.

Додавання легуючих елементів (наприклад, силіцію або магнію) може впливати на форму графітових включень та властивості графіту.

Твердий чавун має високий вміст вуглецю у вигляді графіту. Формується при швидкому затвердінні.

М'який чавун має більше перліту (фериту та цементиту) та менше графіту. Виникає при повільному затвердінні та низьких концентраціях вуглецю.

Тріщини у виливку виникають через великі температурні градієнти або неоднаковий затвердіння.

Порожнечі (раковини) можуть утворюватися внаслідок недостатнього наповнення піщаної форми.

Газові включення виникають через відсутність доброї дегазації чавуну.

Неоднорідності в мікроструктурі можуть бути спричинені нерівномірністю температури або недостатньою металургічною обробкою.

Щоб уникнути дефектів і отримати бажану макро- і мікроструктуру, важливо контролювати параметри ливарної технології, такі як температура, швидкість затвердіння, і хімічний склад чавуну.

В даній кваліфікаційній роботі для дослідження прийнято виливок "Кришка передня". Метою та завданнями кваліфікаційної роботи є вивчення і дослідження процесу затвердіння і охолодження виливка "Кришка передня" в піщано-глинистій формі; розробка технології лиття виливка "Кришка передня"; розрахунок часу і середньої швидкості затвердіння виливка; визначення тривалості витримки виливка у формі до температури вибивки і кількості теплоти, що втрачає виливок на різних стадіях охолодження.

Розділ 2. Технологія лиття виливка “Кришка передня”

2.1. Аналіз конструкції деталі і технічних умов на виливок “Кришка передня”

Виливок відноситься до XII класу точності за ДСТУ 26645 – 05, виготовляється із сірого чавуну марки СЧ-25 за ДСТУ 1412-05, припускається виготовлення із чавуну марки СЧ-20 за ДСТУ 1412-05 [14, 15]. Різностінність має становити не більше 3 мм, короблення – не більше 2 мм, перекіс по роз’єму – до 1,5 мм. На оброблюваних поверхнях допускаються одиничні раковини. На необроблюваних поверхнях допускаються одиничні раковини розміром не більше 2 мм, глибиною не більше 1 мм і в кількості не більше 5 на поверхню.

Деталь “Кришка передня” представляє собою частину гідравлічного насосу, який призначається для перекачування рідин. Маса деталі 2,05 кг, габаритні розміри 118×90×26,2 мм, твердість 170...220 НВ.

Деталь має 11 отворів, із них 4 отвори Ø9 мм, 4 отвори під різьбу М10, 2 отвори Ø5 мм, один отвір Ø20 мм. Також деталь не має з’ємних частин, роз’єм моделі і форми один.

Загалом конструкція деталі є технологічною.

2.2. Розробка технологічного процесу виготовлення виливка “Кришка передня”

2.2.1. Вибір обладнання для виготовлення ливарних форм та стрижнів

Для виготовлення відливка “Кришка передня” застосовуємо автоматичну ливарну лінію типу Л22821 [16]. На цій лінії весь процес отримання виливка, від операції формовки до вибивки готової форми, автоматизовано. Розмір

опоки в “світлі” 500×400 мм. Висота верхньої опоки дорівнює висоті нижньої – 150 мм. Модельні плити односторонні, на одній плиті змонтовані частини моделі для оформлення “низу” форми, на іншій – для “верху”.

Цикл виготовлення виливків включає наступні операції: зіштовхування комплекту порожніх опок з візків безперервно рухомим конвеєром, розпаровку опок, роздільну формовку верхньої і нижньої напівформ, витяжку моделей, установку напівформ на допоміжний конвеєр для становлення стрижнів, зборку форм, передачу зібраних форм на ливарний конвеєр, навантаження форм грузами, заливку, охолодження і вибивку форм.

Встановлення стрижнів і заливка форм здійснюється вручну. Оскільки маса стрижнів не перевищує 10 кг, то для їх виготовлення використовуємо універсальний стрижневий автомат моделі 4509 А (табл. 2.1) [16].

Стрижні виготовляються у гарячих ящиках з швидкотвердіючих термореактивних сумішей, що дає можливість підвищити їх точність, а відповідно і точність відливків.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика пікострільного автомату моделі 4509А

Назва характеристики	Величина
Найбільша маса стержня, кг	10
Продуктивність, з'ємів/год.	120...140
Розміри стержневого ящика, мм	600×400×200
Тривалість циклу,с	25
Ємність робочого резервуара, л	25
Потужність електродвигуна, кВт	140
Габарити, мм	4700×3900×3000
Маса, кг	13000

2.2.2. Визначення положення відливка у формі

Положення виливка у формі в період заливки приймаємо горизонтальним (креслення ПМ-131.24.05.02.01.00.00 КС), оскільки оброблювані поверхні – посадочні місця на валу, повинні бути розташовані горизонтально для запобігання утворенню раковин, дефектів, пористості. Поверхня роз'єму моделі і форми при цьому займає горизонтальне положення і є єдиною для даного виливка, що полегшує застосування машинної формовки. Поверхня роз'єму розташована так, що модель не має з'ємних частин. Роз'єм моделі і форми розташовується таким чином, що виливок знаходиться лише в нижній напівформі. Такий роз'єм забезпечує хорошу набивку форми, її складання, надійність встановлення стрижнів, зручність контролю розмірів форми, вільне вилучення моделі із форми.

2.2.3. Вибір припусків на механічну обробку і усадку, радіусів галтелей і формувальних кутів, розміри стрижнів та стрижневих знаків

Розміри литого виробу відрізняються від розмірів готової деталі на величину припусків на механічну обробку. Величину припусків для чавуну марки СЧ-25 приймаємо згідно ДСТУ 1855-05. На кресленні границі припусків вказуємо тонкою лінією і зазначаємо величину припуску, яка згідно ДСТУ 1855-05 для даної деталі складає: для верхньої поверхні – 3,5 мм, для нижньої – 3 мм [17].

Припуск на ливарну усадку виражається у відсотках від розміру виливка. Значення величини ливарної усадки для СЧ-25 приймаємо згідно [17].

Для середніх за масою чавунних виливків вільна усадка становить 1%. Величину радіуса заокруглень приймаємо в межах $1/3$ середнього арифметичного значення товщини спряжених стінок. Для даного виливка

радіус заокруглень складає 5 мм. Мінімальні радіуси заокруглень приймаємо із [17].

Радіуси заокруглень проставляємо на кресленні деталі, невказані радіуси вказуємо на вільному полі креслення.

Формувальні кути призначаємо в залежності від розмірів виливка і прийнятої технології виготовлення форми і стрижнів у відповідності з ДСТУ 3212-05. Величини мінімальних формувальних кутів приймаємо із [17]. Для даного виливка величина ливарних кутів складає 2° .

Розміри стрижня вибираються з урахуванням припуску на механічну обробку і ливарну усадку. Розміри стрижневих знаків приймаємо у відповідності з ДСТУ 3606-05. В залежності від номінального розміру отвору і відношення довжини отвору до цього розміру вибираємо вертикальні знаки стрижнів, нижній довжиною 20 мм, а нижній – 15 мм [17].

Прийняті величини кутів знакових частин складають для нижнього знаку – 7° , а для верхнього 10° . Величину зазорів між знаками і формою приймаємо в залежності від максимального розміру стрижня. Для верхнього знаку торцевий зазор – 0,4 мм.

2.3. Розрахунок та конструювання ливниково-живильної системи

2.3.1. Визначення габаритних розмірів опоки

Габарити опок визначаємо габаритами виливка, кількістю виливків в одній опоці, розмірами ливникової системи, правильністю розміщення моделей на підмодельній плиті. Правильність розміщення моделей на підмодельній плиті для даного розміру опок визначається коефіцієнтом металоємності, тобто співвідношення загальної ваги металу у формі до ваги формувальної та стрижневої маси в опоці. Коефіцієнт металоємності залежить від складності, товщини стінки і габаритів виливка і знаходиться у межах 0,25...1,2.

Відстань між окремими моделями дорівнює $(0,3...0,5) \cdot h$, де h – висота моделі у верхній та нижній напівформах. При формовці в одній опоці декількох виливків, залитих через загальну ливникову систему, відстань в площині роз'єму між ними повинна бути $\leq 20...25$ мм [17]. Відстань від виливка до стінок опоки складає 50...100 мм; від стрижневого знаку до бокової стінки опоки – до 50 мм.

Враховуючи, що для виготовлення вимливка застосовуємо автоматичну лінію з розмірами опоки 500×400×150/150 мм приймаємо кількість виливків в одній опоці рівною – 6 шт (креслення ливарної форми в зборі ПМ-131.24.05.02.04.00.00 КС).

2.3.2. Визначення оптимальної тривалості заливки.

Ливникова система складається з послідовно з'єднаних між собою каналів по яких розплав підводиться у робочу порожнину ливарної форми.

Оптимальну тривалість заливки визначаємо за формулою [17]:

$$t = S_1 \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot C_1}, \quad (2.1)$$

де S_1 – коефіцієнт, $S_1 = 0,9$;

δ – середня товщина стінок виливка, $\delta = 25,5$ мм;

C_1 – вага одного виливка з ливниковою системою, кг.

$$C_1 = C_b + 0,4 \cdot C_b \quad (2.2)$$

$$C_1 = 2,05 + 0,4 \cdot 2,05 = 2,8 \text{ кг}$$

Тоді:

$$t = 0,9 \cdot \sqrt[3]{25,5 \cdot 2,8} = 3,7 \text{ сек}$$

Середню швидкість підйому рівня металу у формі визначаємо за формулою:

$$V = \frac{C}{t}, \quad (2.3)$$

де C – висота виливкуа, мм;

t – оптимальна тривалість заливки, сек.

$$V = \frac{33}{3,7} = 8,9 \text{ мм / сек.}$$

Розрахункова тривалість заливки забезпечує швидкість підйому рідкого металу у формі вище мінімально допустимої – 4 мм / сек. [17].

2.3.3. Визначення площ перерізу каналів ливникової системи

Загальну площу живильників на один виливок розраховуємо за формулою [17]:

$$\sum F_{ж} = \frac{G \cdot 1000}{\mu \cdot t \cdot \gamma \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}, \quad (2.4)$$

де G – вага (маса) одного відливка, з ливниками, кг;

μ – коефіцієнт витрати для даного типу ливникової системи, $\mu = 0,35$ [17];

g – прискорення сили тяжіння, 981 мм/сек²;

H_p – середній гідростатичний тиск (напір), см.

Середній гідростатичний тиск визначаємо за формулою [17]:

$$H_p = H_0 ; \quad (2.5)$$

де H_0 – висота металу в верхній опоці, $H_0 = 150$ мм;

$$\sum F_{жс} = \frac{2,8 \cdot 1000}{0,35 \cdot 3,7 \cdot 7,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 15}} = 1,6 \text{ см}^2$$

Приймаємо форму поперечного перерізу живильника – трапецію (креслення ПМ-131.24.05.02.01.00.00 КС).

Розраховуємо площу шлаковловлювача:

$$\sum F_{жс} : \sum F_{ш} : \sum F_{ст} = 1:1,1:1,2 \quad (2.6)$$

$$\sum F_{ш} = \sum F_{жс} \cdot 1,1 = 1,6 \cdot 1,1 = 1,76 \text{ см}^2$$

Оскільки стояк в формі розміщено посередині форми, а шлаковловлювач живить з різних сторін не однакову кількість виливків, то площу його поперечного перерізу розраховуємо окремо:

для чотирьох відливків:

$$F_{ш1} = 1,76 \cdot 4 = 7,04 \text{ см}^2$$

для двох відливків:

$$F_{ш2} = 1,76 \cdot 2 = 3,52 \text{ см}^2$$

Приймаємо форму поперечного перерізу шлаковловлювача трапецевидною (креслення ПМ-131.24.05.02.01.00.00 КС)

Площа поперечного перерізу стояка:

$$F_{\text{ст}} = \sum F_{\text{ш}} \cdot 1,2 \quad (2.7)$$

$$F_{\text{cm}} = (7,04 + 3,25) \cdot 1,2 = 12,35 \text{ см}^2$$

Оскільки:

$$F_{\text{ст}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ст}}^2}{4} \quad (2.8)$$

Діаметр стояка:

$$d_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{ст}}}{\pi}} \quad (2.9)$$

$$d_{\text{cm}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12,35}{3,14}} = 3,97 \text{ см}$$

Приймаємо $d = 40$ мм (креслення ПМ-131.24.05.02.01.00.00 КС).

Визначимо діаметр чаші:

$$D = (2,7 \dots 3) \cdot d_{\text{ст.в}} \quad (2.10)$$

$$D = 2,8 \cdot 40 = 112 \text{ мм}$$

Приймаємо $d = 112$ мм (креслення ПМ-131.24.05.02.01.00.00 КС).

2.4. Опис технологічного процесу виготовлення виливка

2.4.1. Вибір формувальної та стрижневої суміші

У масовому і серійному виробництві рекомендується використовувати єдину формувальну суміш.

На автоматичній лінії Л22821 використовується формувальна суміш з підвищеною рідкоплинністю. Склад та механічні властивості стрижневої та формувальної сумішей наведено у таблицях 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2 – Склад і фізико-механічні властивості формувальної суміші

Складова суміші і параметри	Значення параметру
Зворотня суміш, %	96
Пісок кварцовий КО2, КО16, %	3
Вугілля гранульоване, %	0,15
Бентоніт, %	0,15
Вода, %	3,0 - 4,0
Вміст глиняної складової, %	11
Вміст активного бентоніту, %	8
Втрати при прожарюванні %	3
Вологість, %	3,5
Міцність на стиснення у сирому стані, МПа	0,12 - 0,15
Газопроникність, одиниць	80
Плинність (по Орлову), одиниць	80

2.4.2. Формовка

Основну частину форм одержують машинною формовкою. За допомогою машин механізовано дві основні операції – ущільнення суміші, видалення моделі з форми і деякі інші.

Процес виготовлення форм в опоках іде у такому порядку: формувальна суміш подається в бункери встановлені над пресовими машиною. Порожні опоки подаються за допомогою рольгангів. Нижню і верхню напівформи виготовляють на різних машинах. За допомогою дозатора заповнюють опоки формувальною сумішшю з бункера. Далі суміш ущільнюють, готову напівформу кантують, знімають надлишок суміші і виконують обдув форми. Після цього готові напівформи транспортують на збирання.

Таблиця 2.3 – Склад стрижневої суміші і її фізико-хімічні властивості

Складові суміші і властивості	Значення параметра
Пісок кварцевий, %	95,24
Смола СФ, %	3,54
Каталізатори М1, %	0,7
Гас, %	0,52
Керосин освітлювальний, %	0,62
Газопроникність, одиниць	80
Міцність на стиснення у сирому стані, МПа	0,005 - 0,01
Вологість, %	1,8-2,8

2.4.3. Збирання форм

Точність збирання в значній мірі визначає точність геометричних розмірів виливка. В об'єм робіт по збиранню форми входять такі операції:

- 1) збирання форми;
- 2) спарювання верхньої та нижньої опок.

2.4.4. Заливка форм

Температура чавуну при заливці повинна бути 1320-1370°C. Заливка може виконуватись в рухому і нерухому форми. Розплавлений метал з печі подається у попередньо нагрітий ківш конічного типу ємністю 1т, який транспортується краном. Цей ківш встановлюють на спеціальному стенді для подальшої роздачі металу в розливні ковші.

Для заливки металу використовують ковші “чайникового” типу ємністю 250 кг. Перед заливкою металу, потрібно видалити шлак з розливного ковша. При заливці ківш підводиться і встановлюється носок ковша над ливниковою чашею форми на відстані 150 – 200 мм. Заливка виконується швидко. Забороняється переливати чашу, недолив чаші дозволяється – 20 мм. Заливка повинна бути безперервною. Після заливки залишки металу повинні зливатись у спеціальні форми. Тип плавильного агрегату вибирається в залежності від роду металу, а також вимог, які висуваються до якості виливків. Для плавки сірого чавуну використовуємо електричну індукційну піч.

2.4.5. Вибивка і обрубка

Залиті та охолоджені форми подаються на вибивний пристрій. Коливання решітки передається суміші і виливкам. В цих умовах ком суміші руйнується і

суміш проходить через щілини решітки, та поступає на подальшу переробку. Виливки зісковзують на пластинчастий конвеєр рухаючись по якому вони охолоджуються; далі подаються в галтувальний барабан в якому додатково очищуються та охолоджуються.

Після попередньої очистки виливки поступають в прохідну дробометну камеру де вони позбавляються від пригару. Після цієї операції литі вироби проходять зачистку від заусениць на наждачних верстатах. Після цього вони поступають на дільниця контролю якості де проходять проміжний контроль (по всіх стадіях технологічного процесу) і кінцевий. При цьому перевіряється хімічний склад, структура, геометричні розміри. Поверхневі дефекти визначають візуально.

2.5. Опис процесу проектування ливарної оснастки

При крупносерійному і масовому виробництві для збільшення строку служби моделей, їх необхідно виготовляти металевими. Заготовки металевих моделей отримують литтям у піщані форми по дерев'яним промоделям. Промоделі виготовляються з припуском на механічну обробку моделі і виливка, а також з урахуванням усадки сплаву моделі. Модель виготовляється із сірого чавуна марки СЧ20. Обробляються моделі вручну, припуск на механічну обробку в виливка – 3,5 мм. Товщину тіла моделі визначають із номограми в залежності від габаритів моделі [17]. З урахуванням малих габаритних розмірів виливка модель відливається суцільною. Після механічної обробки моделі монтуються на раніше підготовані підмодельні плити. При монтажі моделей на плити необхідно враховувати розміри опок. Контур опоки в “світлі” 500×400 мм. Таким чином обидві моделі розташовуються на плиті так, щоб відстань від них до країв складала не менше 30 мм. Ливникова система монтуються у відповідності з кресленням ливникової системи. Кріплення моделей і ливникової виконується гвинтами. Монтаж моделей на плитах виконується за допомогою монтажного шаблона, виготовленого з листової сталі товщиною 2...5 мм.

Модельні плити виготовляються із сталі марки 45 (креслення ПМ-131.24.05.02.02.00.00 КС і ПМ-131.24.05.02.03.00.00 КС). Товщина плит складає 50 мм оскільки вони повинні витримувати навантаження при формовці. Робоча поверхня плит повинна бути оброблена. На підготовлені плити накладається монтажний шаблон, встановлюються напівмоделі і просвердлюються отвори для кріплення. Моделі є кондукторами, отвори свердляться одночасно і в плиті і в моделі. Потім плита з отворами накладається на іншу плиту і в останній просвердлюються отвори. На плиту встановлюються напівмоделі і кріпляться гвинтами. Після кріплення моделей устаноується ливникова система. До плити для нижньої напівформи кріпляться моделі живильників, а на плиту верха – моделі шлаковловлювачів. Підмодельні плити повинні мати елементи спарювання з опоками. На одній плиті повинні бути: з однієї сторони – центруючий, з іншої – направляючий штирі. На другій плиті необхідно мати відповідно центруючий і направляючий отвори. Модельні плити на формувальній машині кріпляться за допомогою болтів.

Для виготовлення стрижнів піскострільним способом застосовується алюмінієвий стрижневий ящик (креслення ПМ-131.24.05.02.05.00.00 КС). Заготовку ящика отримуємо литтям у піщані форми по дерев'яним моделям.

При виготовленні моделі ящика необхідно врахувати усадку алюмінієвого сплаву, яка складає 1,25%. Також враховуємо припуск на механічну обробку ящика, який при зачистці складає 0,4 мм. Для визначення товщини тіла стрижневого ящика необхідно знати габаритні розміри. Товщину стінок ящика визначаємо із номограми [17]. Для стрижневих ящиків із алюмінієвих сплавів товщина стінок складає 10 мм. По таблицям визначаємо товщину ребер жорсткості і радіуси галтелей. При товщині стінок стрижневого ящика 10 мм товщина ребер жорсткості складає 10 мм, а радіус галтелей рівний 5 мм. Стрижневий ящик відливається у відповідності з розмірами і піддається механічній обробці. Площина роз'єму ящика шліфується для якісного прилягання обох половин ящика одної до одної. Половини ящика з'єднуються за допомогою штирів.

Розділ 3. Дослідження теплового стану виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі

3.1. Аналіз теплових умов формування виливка “Кришка передня”

Для процесу лиття чавуну в піщану форму характерна низька інтенсивність теплообміну виливка з формою. Значення критерія Біо, що характеризує цю інтенсивність, приймає низьке значення ($Bi_1 \ll 1$ – критерій Біо) [18]. З урахуванням такої обставини температурний перепад по перерізу виливка дуже малий, тобто температура робочої поверхні форми і виливка у точці контакту мало відрізняються від температури у центральній частині виливка. Це в свою чергу означає, що охолодження виливка буде відбуватися одночасно і рівномірно по всьому об'єму і затвердіння виливка практично починається не раніше, ніж коли рідкий метал залитий у форму, втратить теплоту перегріву, а охолодження твердої частини відливка – тільки після повного його затвердіння. Таким чином з'являється можливість розглядати стадії теплопередачі окремо: 1) відведення теплоти перегріву від розплаву у формі; 2) затвердіння виливка; і 3) охолодження твердого виливка, незалежно одна від одної. Це є дуже важливою особливістю процесів затвердіння, які відбуваються при відносно низькій інтенсивності теплообміну.

Нехай маємо випадок лиття, коли поєднано такі співвідношення:

$$Bi_1 = \frac{\beta}{\lambda_1} x_1 \ll 1; \quad Bi_2 = \frac{\beta}{\lambda_2} x_2 \gg 1 \quad (3.1)$$

де β – коефіцієнт теплопередачі.

Якщо ливарна форма піщана, а виливок металевий, то λ_1 (коефіцієнт теплопровідності матеріалу виливка) як мінімум в десять разів вищий λ_2 (коефіцієнт теплопровідності матеріалу ливарної форми), тобто $\lambda_1 \gg \lambda_2$, або $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \gg 1$. Ці нерівності записані на підставі того, що величина β стосується обох критеріїв, а розміри виливка x_1 і стінки форми x_2 не дуже відрізняються один

від одного і не можуть помітно змінити відносну величину обох критеріїв. Така умова має місце при тепловій взаємодії металевого виливка з неметалевою формою.

З урахуванням виразу (3.1) маємо:

$$Bi_1 = \frac{\beta}{\lambda_1} x_1 \ll 1, \quad (3.2)$$

і

$$Bi_1 = \frac{T_0 - T_{1п}}{T_{1п} - T_{2п}} \ll 1, \quad (3.3)$$

і

$$Bi_2 = \frac{\beta}{x_2} x_2 \gg 1, \quad (3.4)$$

і

$$Bi_2 = \frac{T_{1п} - T_{2п}}{T_0 - T_{1п}} \gg 1, \quad (3.5)$$

З виразу (3.2) слідує, що при $Bi_1 \ll 1$ або $\beta \rightarrow 0$, або $\frac{\lambda_1}{x_1} \rightarrow \infty$. Фізично це означає, що теплова провідність виливка набагато більше теплової провідності форми.

З виразу (3.3) маємо, що $T_0 - T_{1п} \ll T_{1п} - T_{2п}$, тобто температурним перепадом по об'єму виливка можна знехтувати у порівнянні з перепадом температури у формі. Спрощену схему такого процесу показано на рис. 3.1.

З виразу (3.4) маємо, що $Bi_2 \gg 1$. Це можливо або при $\beta \rightarrow \infty$, або при $\frac{\lambda_2}{x_2} \rightarrow 0$. Фізично це означає, що у процесі нагрівання форми її теплова провідність низька. З виразу (3.5) це можна записати так: $T_{1п} - T_{2п} \gg T_0 - T_{1п}$, тобто перепадом температур у ливарній формі не можна знехтувати. В цьому випадку схему на рис. 3.1 можна ще спростити, і прийняти її як розрахункову (рис. 3.2).

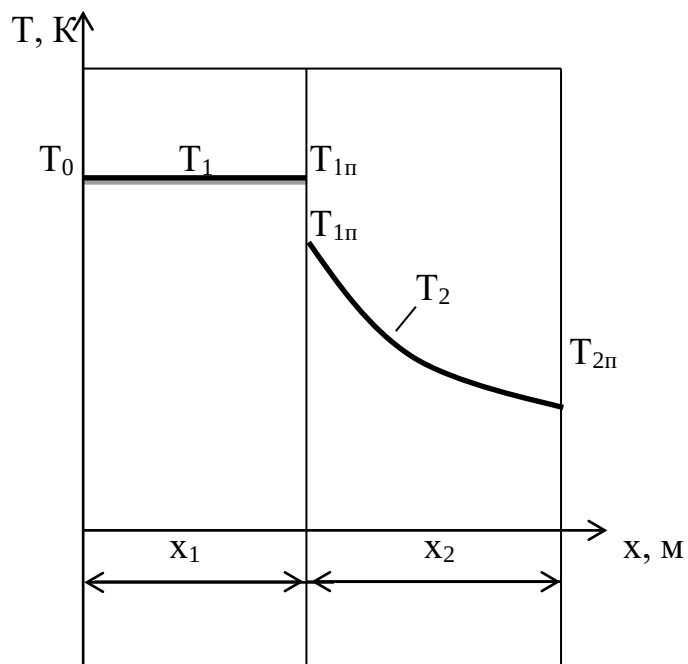


Рис. 3.1 – Спрощена схема температурних полів у системі металевий виливок неметалева форма

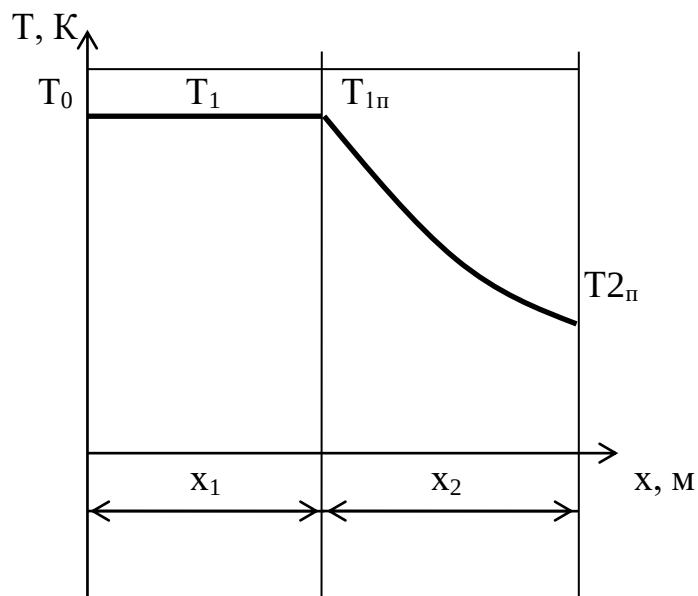


Рис. 3.2 – Остаточна схема для розрахунку теплообміну виливка з піщаною формою за умови низької інтенсивності теплообміну

Ця схема і є розрахунковою для охолодження виливка з низькою інтенсивністю і нагрівання форми з високою інтенсивністю. Її використаємо для розрахунку виливка “Кришка передня”.

Отже, отримана умова $\frac{Bi_1}{Bi_2} \ll 1$ включає як випадок низької інтенсивності теплообміну, так і випадок ідеального контакту між виливком і формою. Це узгоджується з більшістю наукових праць, в яких вивчали теплову взаємодію виливка саме з піщаною формою.

3.2. Математичне формулювання задачі затвердіння виливка “Кришка передня” у піщано-глинистій формі

Математичний опис процесу затвердіння відливка “Кришка передня” необхідно розпочати з моменту повної заливки ливарної форми. Для опису процесу передачі теплоти у рідкій фазі відливка рівняння Фур'є приймає такий вигляд [18, 19]:

$$\frac{\partial T_1(x;\tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x;\tau)}{\partial x^2}; \quad 0 < x < \xi_L(\tau), \tau > 0 \quad (3.6)$$

де a_1 – коефіцієнт теплопровідності у рідкій фазі, m^2/s ;

T_1 – функція температури у рідкій фазі, $^{\circ}C$;

$\xi_L(\tau)$ – координата фронту кристалізації, що переміщається з плином часу у напрямку центра відливка, m ;

τ – поточний час, s ;

$0 < x < \xi_L(\tau)$ – поточна координата в рідкій фазі.

У двохфазній зоні проходить кристалізація розчину, із поверхні кристалів виділяється прихована теплота. Тому це має бути враховане в рівнянні теплопровідності Фур'є. Для двохфазної зони рівняння приймає наступний вигляд [19]:

$$\rho_2 C_{\text{еф}} \cdot \frac{\partial T_2(x;\tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2(x;\tau)}{\partial x^2}; \quad \xi_L(\tau) < x < \xi_S(\tau), \tau > 0 \quad (3.7)$$

i

$$T_S < T < T_L \Rightarrow C_{\text{еф}} = \frac{C_p + C_\tau}{2} + \frac{L}{(T_L - T_S)}$$

де $C_{\text{еф}}$ – ефективна спектральна теплоємність сплаву у двохфазній зоні, Дж/(кг · °C);

ρ_2 – густина матеріалу двохфазної зони, кг/м³;

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу двохфазної зони, Вт/(м · °C);

T_2 – функція температури у двохфазній зоні, °C;

T_L – температура ліквідусу, °C;

T_S – температура солідусу, °C;

$\xi_L(\tau) < x < \xi_S(\tau)$ – поточна координата у двохфазній зоні.

В останньому рівнянні доданок $\frac{L}{(T_L - T_S)}$ є теплота, яка виділяється з одиниці маси сплаву при зниженні температури на один градус у процесі його кристалізації. Приймається, що ця теплота розподіляється в межах інтервалу $T_L - T_S$ рівномірно.

Для твердої кірки рівняння теплопровідності Фур'є має вигляд:

$$\frac{\partial T_3(x;\tau)}{\partial \tau} = a_3 \frac{\partial^2 T_3(x;\tau)}{\partial x^2}; \quad \xi_S(\tau) < x < l_0, \tau > 0 \quad (3.8)$$

де T_3 – функція температури у твердій кірці, °C;

a_3 – коефіцієнт температуропровідності твердої фази, м²/с;

l_0 – половина товщини стінки відливка кронштейна, м;

$\xi_S(\tau) < x < l_0$ – поточна координата у твердій кірці.

Для стінки ливарної форми рівняння теплопровідності Фур'є приймає вигляд:

$$\frac{\partial T_4(x;\tau)}{\partial \tau} = a_4 \frac{\partial^2 T_4(x;\tau)}{\partial x^2}; \quad l_0 < x < l_0 + l_\phi, \tau > 0 \quad (3.9)$$

де a_4 – коефіцієнт температуропровідності стінки форми, $\text{м}^2/\text{с}$;

T_4 – функція температури у стінці ливарної форми, $^\circ\text{C}$;

l_ϕ – товщина стінки форми, м ;

$l_0 < x < l_0 + l_\phi$ – поточна координата стінки форми.

Дуже важливим є правильний вибір початкових та граничних умов для відливка, що твердне. Отже, початковими умовами затвердіння відливка кронштейна будуть: $\xi_L(0) = l_0$ – координата рідкої фази дорівнює половині товщині стінки відливка; $\xi_S(0) = l_0$ – координата фронту затвердіння дорівнює половині товщини стінки відливка; $T_1(x,0)=T_{\text{зал}}$ – початкова температура розплаву, рівна температурі заливки; $T_4(x,0)=T_c$ – температура стінки форми, рівна температурі навколишнього середовища, T_c ; $\varepsilon_L(0) = 0$ – ширина двохфазної зони, рівна нулю; $\varepsilon(0) = 0$ – товщина твердої кірки рівна нулю.

До граничних умов затвердіння відливка слід віднести усі уявні точки на границях. Отже, необхідно записати усі граничні умови для усіх границь:

- умова симетричного охолодження в центрі стінки відливка:

$$\frac{\partial T(0;\tau)}{\partial x} = 0; \quad (3.10)$$

- гранична умови IV роду для границі між рідкою фазою і двохфазною зоною:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi_L;\tau)}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi_L;\tau)}{\partial x}; \quad (3.11)$$

- гранична умова IV роду для границі між двохфазною зоною і твердою кіркою:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi_S;\tau)}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(\xi_S;\tau)}{\partial x}; \quad (3.12)$$

- гранична умова IV роду для границі між твердою кіркою і стінкою форми:

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(l_0; \tau)}{\partial x} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4(l_0; \tau)}{\partial x}; \quad (3.13)$$

- гранична умова I роду на зовнішній поверхні стінки форми:

$$T_0(l_0 + l_\phi; \tau) = T_c. \quad (3.14)$$

Об'єднавши рівняння (3.6) – (3.14) в єдину систему отримуємо, математичне формулювання поставленої задачі:

$$\frac{\partial T_1(x; \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x; \tau)}{\partial x^2}; \quad 0 < x < \xi_L(\tau), \tau > 0 \quad (3.15)$$

$$\rho_2 C_{\text{еф}} \cdot \frac{\partial T_2(x; \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2(x; \tau)}{\partial x^2}; \quad \xi_L(\tau) < x < \xi_S(\tau), \tau > 0, \quad (3.16)$$

$$T_S < T < T_L \Rightarrow C_{\text{еф}} = \frac{C_p + C_T}{2} + \frac{L}{(T_L - T_S)}$$

$$\frac{\partial T_3(x; \tau)}{\partial \tau} = a_3 \frac{\partial^2 T_3(x; \tau)}{\partial x^2}; \quad \xi_S(\tau) < x < l_0, \tau > 0 \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial T_4(x; \tau)}{\partial \tau} = a_4 \frac{\partial^2 T_4(x; \tau)}{\partial x^2}; \quad l_0 < x < l_0 + l_\phi, \tau > 0 \quad (3.18)$$

Початкові умови:

$$T_1(x, 0) = T_{\text{зал}}; \quad (3.19)$$

$$T_4(x, 0) = T_c; \quad (3.20)$$

$$\xi_L(0) = l_0; \quad (3.21)$$

$$\xi_S(0) = l_0; \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_L(0) = 0; \quad (3.23)$$

$$\varepsilon(0) = 0. \quad (3.24)$$

Граничні умови:

$$\frac{\partial T(0; \tau)}{\partial x} = 0 \text{ – в центрі відливка;} \quad (3.25)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi_L; \tau)}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi_L; \tau)}{\partial x} \text{ – на границі } \xi_L; \quad (3.26)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi_S; \tau)}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(\xi_S; \tau)}{\partial x} \text{ – на границі } \xi_S; \quad (3.27)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(l_0; \tau)}{\partial x} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4(l_0; \tau)}{\partial x} \text{ – на границі } l_0; \quad (3.28)$$

$$T_0(l_0 + l_\phi; \tau) = T_c - \text{на границі } x = l_0 + l_\phi. \quad (3.29)$$

3.3. Розрахунок теплових і технологічних параметрів лиття для виливка “Кришка передня”

При розрахунку теплових і технологічних параметрів лиття для виливка “Кришка передня”, зокрема часу і швидкості затвердіння у піщаній формі можна скористатися різними підходами.

Точним аналітичним рішенням в теорії затвердіння є задача професора математичної фізики Віденського університету І. Стефана [20].

Задача Стефана ґрунтується на наступних положеннях (рис. 3.3):

- 1) тіло, що твердне обмежене однією плоскою поверхнею;
- 2) температура тіла спочатку у всіх точках дорівнює T' . У момент часу, рівний 0, на поверхні тіла вона миттєво знижується до T'' і далі залишається постійною;
- 3) при температурі T_0 , що лежить між T' і T'' , відбувається затвердіння речовини тіла, в результаті якого виділяється питома теплота кристалізації L ;
- 4) теплові характеристики речовини тіла не залежать від температури, але в твердому і рідкому стані можуть приймати різні величини;
- 5) теплопередача як у твердій, так і в рідкій частині тіла, підпорядковується рівнянню Фур'є; конвективні переміщення в рідкій частині не враховуються.

Поточна координата, спрямована перпендикулярно до поверхні тіла, позначається через u ; відстань від границі затвердіння до поверхні тіла - через x .

Потрібно знайти залежність величини x від часу τ , а також рівняння, що описує розподіл температур в тілі в будь-який момент часу.

Математичне формулювання задачі має такий вигляд:

$$\text{для рідкої фази: } \frac{\partial T_p}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2}; \quad (3.30)$$

$$\text{для твердої фази: } \frac{\partial T_T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T_T}{\partial y^2}. \quad (3.31)$$

де a_p і a_T – відповідно, коефіцієнти теплопровідності рідкої і твердої фаз, м²/с.

$$\text{Початкова умова : } T(y, 0) = T'; \quad T(0, 0) = T''. \quad (3.32)$$

Граничні умови:

$$1) \quad T(0; \tau) = T'' = \text{const}, \quad (3.33)$$

$$2) \quad T(x(\tau); \tau) = T_{\text{ср}}, \quad (3.34)$$

$$3) \quad T(\infty; \tau) = T' \quad (3.35)$$

Умова Стефана для границі затвердіння має вигляд:

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} + L\rho \frac{dx}{d\tau} = -\lambda_T \frac{\partial T_T}{\partial y} \quad (3.36)$$

де λ_p і λ_T – відповідно, коефіцієнти теплопровідності рідкої і твердої фаз, Дж/(м×с×К); L – питома теплота кристалізації, Дж/кг; ρ – густина, кг/м³; $\frac{dx}{d\tau}$ – швидкість затвердіння, м/с.

У загальній теорії теплопередачі показується, що рішенням рівняння Фур'є (3.30) і (3.31) є інтеграл Гауса [20]:

$$\text{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{y}{2\sqrt{\alpha\tau}}} e^{-\left(\frac{y}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right)^2} dy \quad (3.37)$$

де $\operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_T\tau}}\right)$ – функція помилок (інтеграл Гауса), яка на границях області

приймає такі значення: $\operatorname{erf}(0) = 0$ і $\operatorname{erf}(\infty) = 1$.

Кожне з рівнянь (3.30) і (3.31) має при вирішенні дати по дві довільних постійних інтегрування. Позначимо їх через C_1 , D_1 і C_2 , D_2 . Таким чином, рішеннями відповідно для температури в твердій і рідкій частинах тіла будуть:

$$T_T = C_1 + D_1 \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_T\tau}}\right); \quad (3.38)$$

$$T_p = C_2 + D_2 \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_p\tau}}\right); \quad (3.39)$$

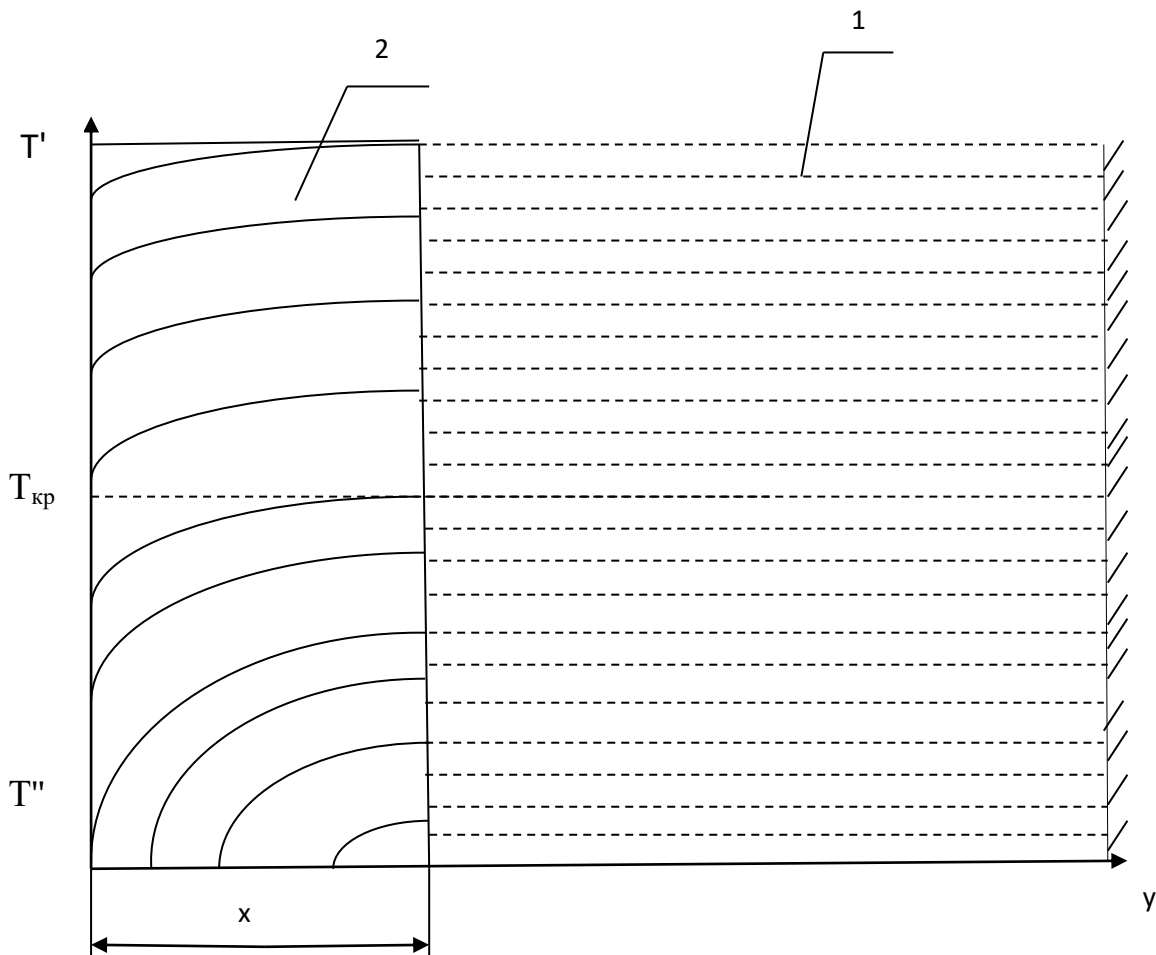


Рис. 3.3 – Схема теплової задачі затвердіння

1 – рідка фаза; 2 – тверда фаза; $T' = T_p = \text{const}$ – початкова температура рідини, К; $T_{\text{кр}} = \text{const}$ – температура кристалізації, К; $T'' = T_{\text{н}} = \text{const}$ – температура на граничній поверхні тіла, К; y – координата (напрямок теплопередачі), м; x – товщина кірки, м.

На основі властивостей інтеграла Гауса отримаємо: при $y=0$ $T_T=C_1=T''$;
при $y=\infty$ $T_p=C_2+D_2=T'$.

Тоді із (3.38) і (3.39) отримаємо:

$$T_T = T'' + D_1 \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_T\tau}}\right); \quad (3.40)$$

$$T_p = T' - D_2[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_p\tau}}\right)] \quad (3.41)$$

На границі затвердіння при $y=x$ і $T_T = T_p = T_0$ отримаємо

$$T'' + D_1 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}}\right) = T' - D_2[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_p\tau}}\right)] = T_0 \quad (3.42)$$

Рівність в (3.42) буде мати місце тільки в тому випадку, коли величина інтеграла Гауса постійна при будь-яких $x/\sqrt{\tau}$. Основним висновком при вирішенні є вимога про пряму пропорційність x величині $\sqrt{\tau}$. Позначивши коефіцієнт пропорційності (затвердіння) між ними через K , отримуємо закон квадратного кореня $x = K\sqrt{\tau}$.

З подвійної рівності (3.42) отримуємо:

$$D_1 = \frac{T_0 - T''}{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}}\right)}; \quad (3.43)$$

$$D_2 = \frac{T' - T_0}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_p\tau}}\right)}; \quad (3.44)$$

Звідки:

$$T_T = T'' + (T_0 - T'') \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_T\tau}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_T}}\right)}; \quad (3.45)$$

$$T_p = T' - (T' - T_0) \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_p\tau}}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_p}}\right)}; \quad (3.46)$$

Для визначення величини K скористаємося рівністю (3.36) і властивостями інтеграла Гауса:

$$\frac{\partial T_T}{\partial y} = \frac{(T_0 - T'')e^{-\frac{y^2}{4a_T\tau}}}{\sqrt{\pi a_T\tau} \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_T\tau}}\right)}; \quad (3.47)$$

$$\left(\frac{\partial T_T}{\partial y}\right)_{x=0} = \frac{(T_0 - T'')e^{-\frac{K^2}{4a_T\tau}}}{\sqrt{\pi a_T\tau} \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_T\tau}}\right)}; \quad (3.48)$$

Відповідно:

$$\left(\frac{\partial T_p}{\partial y}\right)_{x=0} = \frac{(T' - T_0)e^{-\frac{K^2}{4a_p\tau}}}{\sqrt{\pi a_p\tau} \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_p\tau}}\right)}. \quad (3.49)$$

Звідси:

$$\rho_{\text{ж}} L \frac{dx}{d\tau} = \lambda_T \frac{(T_0 - T'')e^{-\frac{K^2}{4a_T\tau}}}{\sqrt{\pi a_T\tau} \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_T\tau}}\right)} - \lambda_{\text{ж}} \frac{(T' - T_0)e^{-\frac{K^2}{4a_p\tau}}}{\sqrt{\pi a_p\tau} [1 - \operatorname{erf}\left(\frac{K}{2\sqrt{a_p\tau}}\right)]}. \quad (3.50)$$

Замінюючи $dx/d\tau$ його значенням, $T_0 - T$ і $T - T_0$ величинами T і t , а також враховуючи, що $\sqrt{\lambda c \rho} = b$, отримаємо:

$$\rho_p L \frac{\sqrt{\pi}}{2} k = b_T T \frac{e^{-\frac{k^2}{4a_T\tau}}}{\operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{a_T\tau}}\right)} - b_p t \frac{e^{-\frac{k^2}{4a_p\tau}}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{a_p\tau}}\right)} \quad (3.51)$$

де $T = T_{\text{кр}} - T''$, $t = T' - T_{\text{кр}}$, $b_T = \sqrt{\lambda_T \times C_T \times \rho_T}$, $b_p = \sqrt{\lambda_p \times C_p \times \rho_p}$,

C_p і C_T – відповідно, теплоємність рідкої і твердої фаз;

ρ_p і ρ_T – відповідно, густина рідкої і твердої фаз;

b_p і b_T – відповідно, коефіцієнти теплової акумуляції для рідкої і твердої фаз;

$$k = \frac{x}{\sqrt{\tau}} \quad - \text{константа затвердіння, м/с}^{0,5}, \quad (3.52)$$

Єдиною невідомою величиною в рівнянні (3.51) є коефіцієнт K , але виразити його в аналітичній формі неможливо. Його доводиться визначати графічно. Для цього слід задатися довільним рядом значень K і обчислюємо окремо праву і ліву частини рівності. Потім будуємо їх графіки в функції K .

Ліва частина графіка представляє собою пряму, що проходить через початок координат; права частина - криву складної форми. Точка їх перетину відповідає значенню K . Сукупність виразів (3.45), (3.46), (3.51) і (3.52) дає вичерпне рішення поставленої задачі. На відміну від простого рішення воно враховує існування перегріву, кривизну ізохрон (ліній розподілу температур в даний момент часу) і дозволяє розрахувати ці ізохрони в будь-який момент часу.

Блок-схему алгоритму розрахунку коефіцієнта затвердіння K на ЕОМ для довільного сплаву показано на рис. 3.4.

Окремим питанням є вибір величини x в законі “квадратного” кореня. Зазвичай будь-який виливок має різну товщину стінок. Можна під x розуміти переважаючу товщину стінок у виливку. Але при цьому зовсім ігнорується конфігурація виливка. Саме тому в [21] Хворіновим запропоновано використати в якості товщини стінки виливка x питомий параметр, як відношення об’єму виливка до величини поверхні, через яку виливок охолоджується в піщану форму:

$$x = \frac{V}{F} \quad (3.52)$$

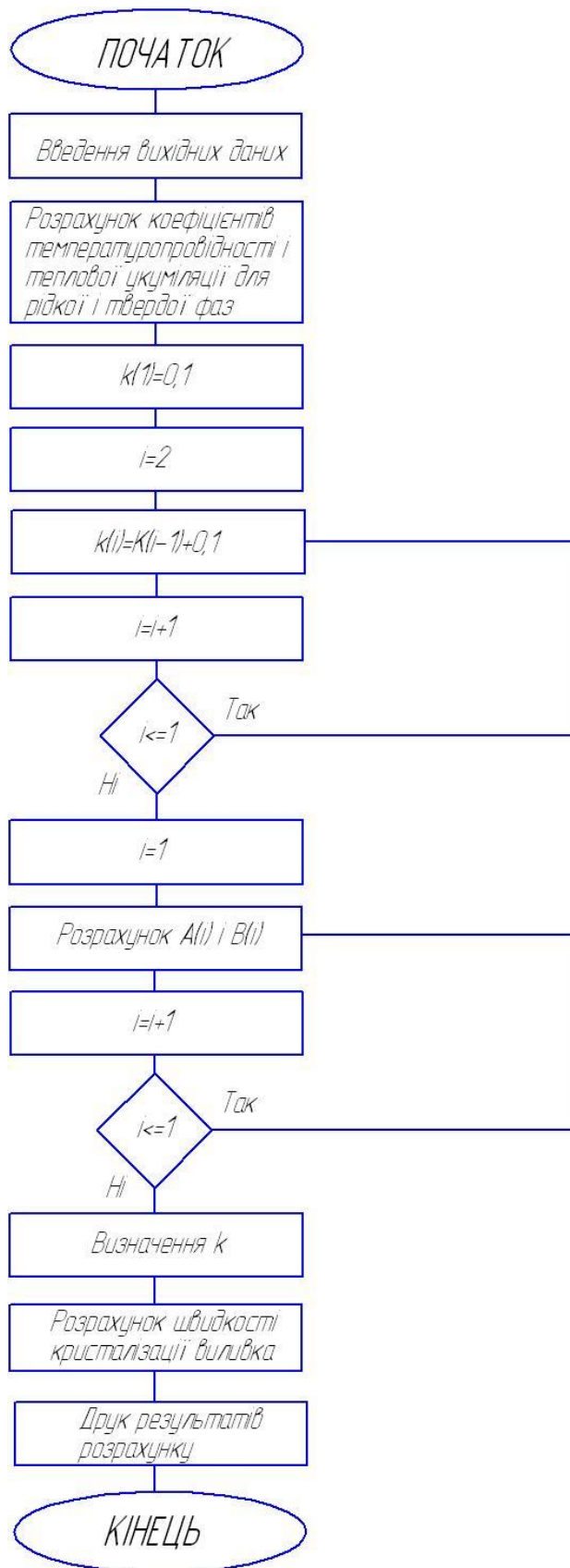


Рис 3.4 – Блок-схема алгоритму розрахунку константи затвердіння

3.4. Порівняльний розрахунок теплових і технологічних параметрів лиття для виливка “Кришка передня”

З більш загальних позицій побудував розрахунки теплових процесів у виливках д.т.н., проф.. А. Й. Вейнік, виклавши їх в серії монографій. Він розбиває тепловий процес у виливку на п'ять стадій [18]:

1) охолодження металу при заповненні форми. Стадія починається при температурі заливки $T_{\text{зал}}$ і закінчується за час τ_1 ; до моменту закінчення стадії можливе утворення твердої кірки товщиною x_1 ;

2) відведення теплоти перегріву. Вихідними величинами для даної стадії є τ_1 і x_1 ; вона закінчується в момент досягнення в центрі виливка температури кристалізації $T_{\text{кр}}$ або ликвідус в разі сплаву; цьому моменту відповідають час τ_2 і товщина твердої кірки x_2 ;

3) затвердіння виливки. Вихідні величини τ_2 і x_2 , кінцеві - τ_3 і x_3 ; стадія закінчується в момент зникнення рідини в центрі виливка;

4) охолодження затвердого виливка у формі. Вихідні величини τ_3 і x_3 , кінцеві - τ_4 і x_4 ;

5) охолодження виливка після вилучення з форми.

Таким чином, параметри, що характеризують початок даної стадії, є завершальними для попередньої стадії.

Розглянемо більш докладно лише третю найважливішу стадію теплового процесу - затвердіння виливка. Нехай маємо найпростіший випадок плоского виливка. Припустимо, що затвердіння металу відбувається при постійній температурі $T_{\text{кр}}$. При наявності інтервалу кристалізації в якості величини $T_{\text{кр}}$ можна вибрати середню температуру між ліквідусом і солідусом. Припустимо, що виливок охолоджується в середовищі з температурою $T_{\text{ср}}$; відведення теплоти з поверхні виливка відбувається за законом Ньютона з коефіцієнтом тепловіддачі α . Обидві ці величини в загальному рішенні приймаються постійними, але для конкретних випадків вони можуть визначатися змінними. Навколишнім середовищем виступає ливарна форма.

Вважається, що з моменту початку процесу минув час τ_2 і товщина затверділої шару склала величину x_2 .

Згідно з тепловою теорією затвердіння А.Й.Вейніка для характеристики температурного поля тіла виливка або форми використовується парабола n – го порядку (рис. 3.5) [18]:

$$T = -(T_{кр} - T_n) \left(\frac{y}{\xi} \right)^n + T_{кр} \quad (3.53)$$

де $T_{кр}$ – температура кристалізації сплаву, °С;

T_n – температура поверхні виливка, °С;

y – змінна координата, що відраховується від границі затвердіння в напрямку до поверхні виливка, м;

ξ – товщина кірки, що затверділа до моменту часу τ , м;

n – показник параболи, вибір якого підпорядковується особливими умовами.

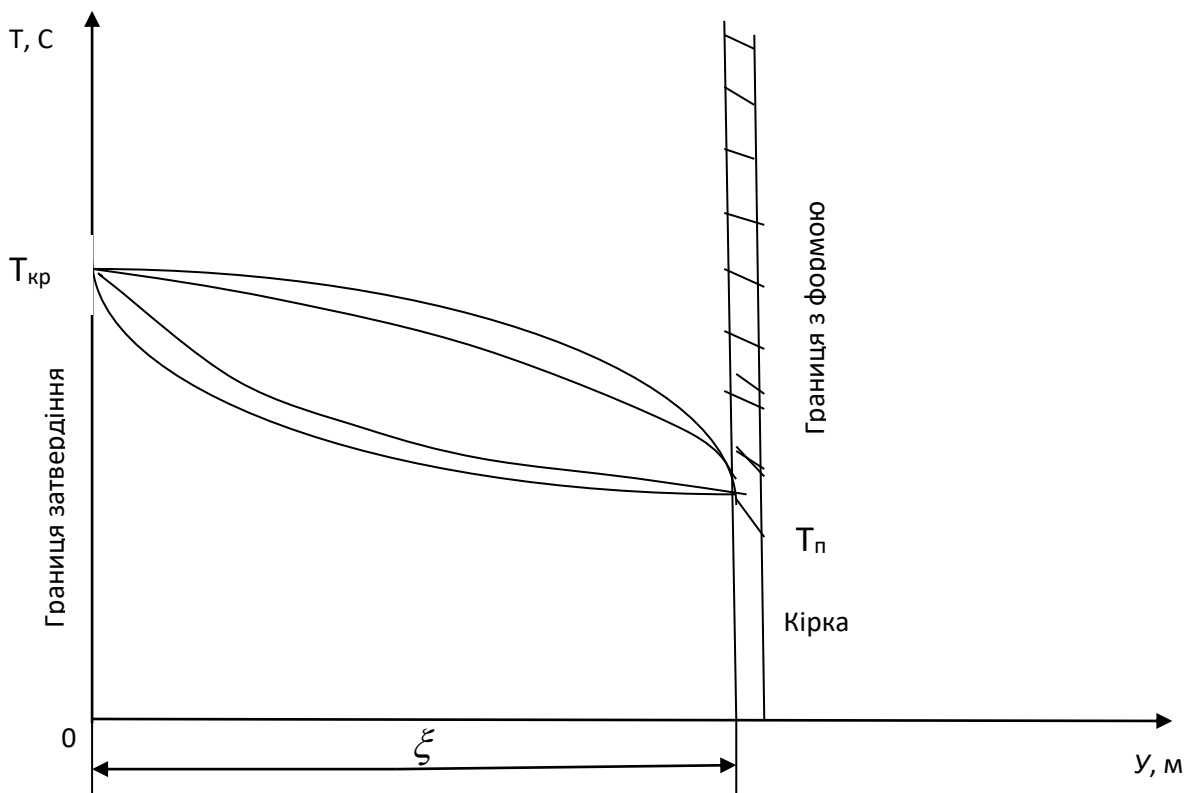


Рис. 3.5 – Температурне поле виливка в піщано-глинистій формі

Час затвердіння виливка типу “плита” визначається як безрозмірна величина [18]:

$$F_0 = A_1(\delta - \delta_2) + A_2(\delta^2 - \delta_2^2) + A_3 \ln \frac{1 + \frac{\delta B_i}{n}}{\delta_2 B_i} \quad (3.54)$$

де δ - безрозмірна товщини стінки виливка;

δ_2 - безрозмірна величина кірки, що з'явилась під час відведення теплоти перегріву;

A_1, A_2, A_3 – коефіцієнти;

$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} l$ – критерій Біо.

де λ – коефіцієнт теплопровідності сплаву, Вт/(м×К);

l – товщина стінки виливка, м;

$\alpha = \frac{\lambda_\phi}{l_\phi}$ – коефіцієнт конвективної тепловіддачі від виливка до форми;

де l_ϕ – товщина стінки форми;

λ_ϕ – коефіцієнт теплопровідності формувальної суміші, Вт/м×К;

$$\delta_1 = 1; \quad \delta_2 = 0; \quad (3.55)$$

$$A_1 = \frac{1}{B_i} \left(L + \frac{1}{n+1} \right); \quad (3.56)$$

$$A_2 = \frac{1}{2n} \left(L + \frac{1}{n+1} \right); \quad (3.57)$$

$$A_3 = - \frac{n}{n+1} \frac{1}{B_i^2}; \quad (3.58)$$

$$L = \frac{\rho_{кр}}{c(T_{кр} - T_c)}, \quad (3.59)$$

де $\rho_{кр}$ – теплота кристалізації, Дж/кг;

c – теплоємність сплаву, Дж/(кг×К);

$T_{кр}$ – температура кристалізації сплаву, К;

T_c – температура стінки форми, К;

Оскільки $F_0 = \frac{a\tau}{l^2}$ – критерій Фур'є і $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, маємо розмірний час затвердіння виливка типу ”плита”:

$$\tau = \frac{F_0 l^2 c \rho}{\lambda}, \quad (3.60)$$

де ρ - густина сплаву, кг/м³;

Для виливка типу “циліндр” безрозмірний час затвердіння становить [18]:

$$F_0 = B_1(\delta - \delta_2) + B_2(\delta^2 - \delta_2^2) + B_3(\delta^3 - \delta_2^3) + B_4 \ln \frac{1 + \frac{\delta B_i}{n}}{1 + \frac{\delta_2 B_i}{n}}; \quad (3.61)$$

де B_1, B_2, B_3, B_4 – коефіцієнти;

$$B_1 = \frac{1}{B_i} \left(L + \frac{1}{n+1} \right) + \frac{n}{(n+1)(n+2)B_i^2}; \quad (3.62)$$

$$B_2 = \frac{1}{2n} \left(L + \frac{1}{n+1} \right) - \frac{1}{2B_i} \left[L + \frac{1}{(n+1)(n+2)} \right]; \quad (3.63)$$

$$B_3 = -\frac{1}{3n} \left(L + \frac{2}{(n+1)(n+2)} \right); \quad (3.64)$$

$$B_4 = -\frac{n}{(n+1)B_i^2} \left(1 + \frac{n}{(n+2)B_i} \right). \quad (3.65)$$

Для виливка типу “куля” безрозмірний час затвердіння становить [18]:

$$F_0 = D_1(\delta - \delta_2) + D_2(\delta^2 - \delta_2^2) + D_3(\delta^3 - \delta_2^3) + D_4(\delta^4 - \delta_2^4) + D_5 \ln \frac{1 + \frac{\delta B_i}{n}}{1 + \frac{\delta_2 B_i}{n}}; \quad (3.66)$$

де D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – коефіцієнти;

$$D_1 = \frac{1}{B_i} \left(L + \frac{1}{n+1} \right) + \frac{2n}{(n+1)(n+2)B_i^2} \left[1 + \frac{n}{(n+3)B_i} \right]; \quad (3.67)$$

$$D_2 = \frac{1}{2n} \left(L + \frac{1}{n+1} \right) - \frac{1}{2B_i} \left[L + \frac{1}{(n+1)(n+2)} + \frac{n}{(n+1)(n+2)(n+3)B_i} \right]; \quad (3.68)$$

$$D_3 = \frac{L}{3} \left(\frac{1}{B_i} - \frac{2}{n} \right) + \frac{2}{3(n+1)(n+2)} \left[\frac{1}{(n+3)B_i} - \frac{2}{n} \right]; \quad (3.69)$$

$$D_4 = \frac{1}{4n} \left[L + \frac{6}{(n+1)(n+2)(n+3)} \right]; \quad (3.70)$$

$$D_5 = -\frac{n}{(n+1)B_i^2} \left[1 + \frac{2n}{(n+2)B_i} + \frac{2n^2}{(n+2)(n+3)B_i^2} \right]. \quad (3.71)$$

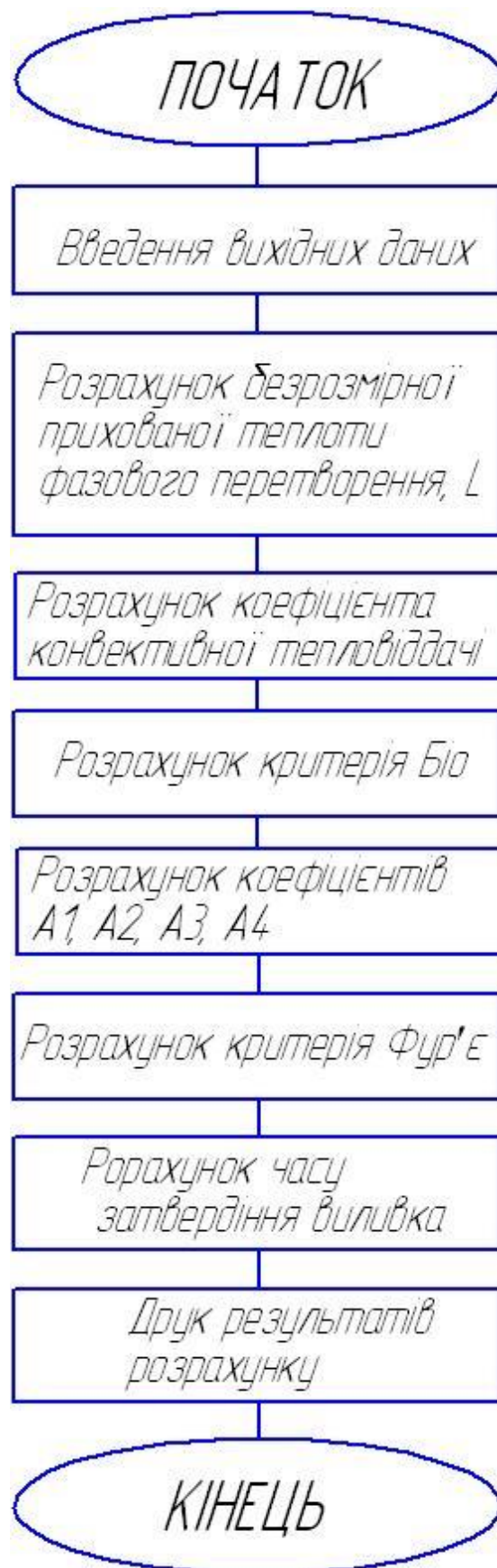


Рис. 3.6 – Блок-схема алгоритму розрахунку часу затвердіння

3.5. Результати розрахунків

Розрахунки виконувалися на персональному ЕОМ при таких вихідних даних:

- 1) товщина стінки відливка “Кришка передня” – 16,4 мм;
- 2) товщина стінки форми – 40 – мм;
- 3) коефіцієнт теплопровідності розплаву чавуну СЧ-25 – 16,7 Вт/(м град);
- 4) густина розплаву – 6970 кг/м³;
- 5) теплоємність розплаву – 840 Дж/(кг град);
- 6) коефіцієнт теплопровідності чавуну (твердого) марки СЧ-25 – 42 Вт/(м град);
- 7) густина чавуну – 7200 кг/м³;
- 8) теплоємність чавуну марки СЧ25 – 560 Дж/(кг град);
- 9) коефіцієнт теплопровідності матеріалу піщано-глинистої форми – 0,705 Вт/(м град);
- 10) густина матеріалу форми – 1580 кг/м³;
- 11) теплоємність матеріалу форми – 1620 Дж/(кг град);
- 12) температура ліквідусу – 1473 °K;
- 13) температура солідусу – 1453 °K;
- 14) початкова температура розплаву – 1673 °K;
- 15) початкова температура ливарної форми – 293 °K;

Метою розрахунку було визначення часу і швидкості затвердіння відливка “Кришка передня” у багатомісній ливарній формі, виготовленій при опочній формовці на автоматичній лінії моделі Л22821 (див. другий розділ).

3.5.1. Результати розрахунків за законом “квадратного” кореня

Використаємо закон “квадратного” кореня (3.52) для виливка “Кришка передня” $k = \frac{x}{\sqrt{\tau}}$ – константа затвердіння, м/с^{0,5}

$$x = k \sqrt{\tau} \quad (3.72)$$

$$\frac{V}{F} = k \sqrt{\tau} \quad (3.73)$$

$k=0,07-0,09$ см/с^{0,5} – коефіцієнт затвердіння для чавуну в піщаній формі [20].

Маємо,

$$\tau = \left(\frac{V}{F \cdot k} \right)^2 = \left(\frac{213}{321 \cdot 0.08} \right)^2 = 69 \text{ сек} = 1,15 \text{ хв}$$

Швидкість затвердіння виливка “Кришка передня” становить

$$v = \frac{V}{F \cdot \tau} = \frac{213}{321 \cdot 69} = 0,1 \text{ мм/сек}$$

Отримане значення швидкості є середнім за процес. Але, оскільки задача розв'язується для випадку коли для виливка критерій Біо менше одиниці, то отримане значення швидкості затвердіння 0,1 мм/сек має бути однаковим для всього процесу. Таким чином, виливок “Кришка передня” твердне з постійною швидкістю.

3.5.2. Результати розрахунків за теорією затвердіння А.Й. Вейніка

3.5.2.1. Час і швидкість затвердіння виливка “Кришка передня”

Використаємо теорію затвердіння А.Й. Вейніка (3.53) для розрахунку виливка “Кришка передня” для випадку низької інтенсивності охолодження в піщаній формі.

Критерій Біо для виливка

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x = \frac{\lambda_{\phi}}{l_a \cdot \lambda} \cdot x = \frac{0,705}{0,04 \cdot 16,7} \cdot 16,35 \cdot 10^{-3} = 0,02 \ll 1, \quad (3.74)$$

Як видно отримали низьку інтенсивність охолодження виливка.

Тоді, час затвердіння:

$$F_0 = \frac{L}{Bi} \cdot (\delta - \delta_2) = \frac{0,22}{0,02} \cdot (1 - 0) = 11 = 173 \text{ сек} = 2,9 \text{ хв} \quad (3.75)$$

де L – безрозмірна теплота фазового перетворення сплаву.

Швидкість затвердіння виливка “Кришка передня” становить:

$$v = \frac{V}{F \cdot \tau} = \frac{213}{321 \cdot 173} = 0,04 \text{ мм/сек} \quad (3.76)$$

Отримані розрахункові дані можуть бути використані для оптимізації технологічного процесу, зокрема довжини гілки охолодження автоматичної ливарної лінії.

3.5.2.2. Кількість теплоти переданої виливком “Кришка передня” у ливарну форму

Згідно з загальними положеннями теорії затвердіння А.Й. Вейніка тривалість перебування виливка в ливарній формі розбивається на стадії. Перша стадія закінчується повним заповненням розплавом ливарної форми. Друга стадія починається з моменту закінчення заливки, а закінчується моментом часу повного відведення теплоти перегріву. Третя стадія – затвердіння виливка. Вона починається з моменту часу закінчення другої стадії, а закінчується повним затвердінням виливка. І остання, четверта стадія – це охолодження твердого виливка у формі до моменту досягнення необхідної температури і вибивки литого виробу з форми. Такий розподіл можливий саме завдяки умові низької інтенсивності теплообміну виливка з ливарною формою. Загалом тверда кірка може рости і на протязі другої стадії. Але, для спрощення розрахунків, в даній роботі, припустили, що тверда кірка росте від поверхні форми в середину робочої порожнини ливарної форми тільки протягом третьої стадії.

Кількість теплоти перегріву $Q_{\text{пер}}$ для виливка “Кришка передня” розраховували згідно даної теорії за формулою [18]

$$Q_{\text{пер}} = 4,18 V_1 \rho_1 c_1 (T_{\text{зал}} - T_{\text{кр}}), \text{Дж} \quad (3.77)$$

де V_1 – об’єм виливка;

ρ_1 – густина розплаву;

c_1 – теплоємність розплаву;

$T_{\text{зал}}$ – температура заливки;

$T_{\text{кр}}$ – температура кристалізації сплаву.

Отже,

$$Q_{\text{пер}} = 4,18 \cdot 213 \cdot 10^{-6} \cdot 6950 \cdot 840 (1400 - 1190) = 1091539, \text{ Дж}$$

або

$$Q_{\text{пер}} = 1092 \text{ кДж.}$$

Кількість теплоти кристалізації $Q_{\text{кр}}$ для виливка “Кришка передня” розраховували згідно даної теорії за формулою [18]

$$Q_{\text{кр}} = 4,18 V_1 \rho_1 c_1 L, \text{ Дж} \quad (3.78)$$

де L – теплота фазового перетворення сплаву, Дж/кг;

Отже,

$$Q_{\text{кр}} = 4,18 \cdot 213 \cdot 10^{-6} \cdot 6950 \cdot 840 \cdot 64000 = 332\,659\,515, \text{ Дж}$$

або

$$Q_{\text{кр}} = 332\,660 \text{ кДж.}$$

Кількість теплоти, відведеної від твердого виливка “Кришка передня” у ливарну форму $Q_{\text{охолод.}}$ розраховували за формулою, аналогічною (3.77) [18]:

$$Q_{\text{охолод.}} = 4,18 V_1 \rho_3 c_3 (T_{\text{кр}} - T_{\text{ф}}), \text{Дж} \quad (3.79)$$

де ρ_3 – густина твердого чавуну;

c_3 – теплоємність твердого чавуну;

$T_{\text{ф}}$ – температура форми.

Таким чином маємо,

$$Q_{\text{охолод.}} = 4,18 \cdot 213 \cdot 10^{-6} \cdot 7200 \cdot 560 (1190 - 20) = 4200126, \text{Дж} \quad (3.80)$$

або

$$Q_{\text{охолод.}} = 4200 \text{ кДж.}$$

Загальну кількість теплоти $Q_{\text{заг.}}$ визначаємо як суму теплоти, що відведена у відповідних стадіях процесу:

$$Q_{\text{заг.}} = Q_{\text{пер}} + Q_{\text{кр}} + Q_{\text{охолод.}} \quad (3.81)$$

Маємо,

$$Q_{\text{заг.}} = 1092 + 332660 + 4200 = 337\,952 \text{ кДж.}$$

3.5.3. Тривалість охолодження виливка “Кришка передня” до температури вибивки

Для приблизного розрахунку часу охолодження ($\tau_{\text{охолод.}}$) чавунного виливка “Кришка передня” у піщано-глинистій формі до температури 200 С застосовується формула Б. В. Кноре [20]:

$$\tau_{\text{охолод.}} = a \sqrt{G} \quad (3.82)$$

де $\tau_{\text{охолод.}}$ – час охолодження чавунного виливка до температури 200 С;

G – вага виливка, т;

a – коефіцієнт, що залежить від конфігурації виливка і товщини його стінки; згідно [20] становить 15 .

Отже,

$$\tau_{\text{охолод.}} = 15 \sqrt{2,05 \cdot 10^{-3}} = 0,68 \text{ год} = 40,75 \text{ хв}$$

Як видно, час охолодження виливка “Кришка передня” значно перевищує час затвердіння, що узгоджується з багатьма науковим свідченнями і загалом з практикою ливарного виробництва. Це можна пояснити стрімкістю затвердіння, коли виділяється значна кількість теплоти фазового перетворення. Разом з цим, охолодження твердого виливка в формі це повільний процес. Нагріта ливарна форма і невисоке значення коефіцієнта теплопровідності піщано-глинистої суміші сприяють цьому.

3.5.4. Час знаходження виливка “Кришка передня” в ливарній формі

Загальний час перебування виливка у ливарній формі ($\tau_{\text{заг.}}$) знаходимо як суму тривалості його затвердіння і тривалості його охолодження до температури 200 С.

Отже, маємо :

$$\tau_{\text{заг.}} = \tau_{\text{затв.}} + \tau_{\text{охолод.}} \quad (3.83)$$

і

$$\tau_{\text{заг.}} = 2,90 + 40,75 = 43,65 \text{ хв} \quad (3.83)$$

За умови вибірки цього ж виливка з форми при температурі 600 С (втричі вищій ніж 200 С) загальний час перебування його у формі, визначений пропорційно, становитиме (втричі менше), приблизно 14-15 хв.

Отже, виконавши математичне моделювання, вдалося дослідити і вивчити тепловий стан виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі і розрахувати основні показники затвердіння і охолодження для цього виробу.

ВИСНОВОК

Проаналізовано вплив кінетики кристалізації на структуроутворення в литому чавунному виробі “Кришка передня”. Наведено особливості послідовної і об'ємної кристалізації ливарних сплавів.

Розроблена технологія виготовлення виливка “Кришка передня” на комплексній автоматичній лінії типу Л22821.

Досліджено тепловий стан виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі. На підставі теорії затвердіння напівнескінченного тіла і закону “квадратного кореня” та теорії затвердіння виливків по А.Й. Вейніку, про параболічний розподіл температури у виливку і ливарній формі, виконано порівняльний розрахунок теплових і технологічних параметрів лиття. Швидкість затвердіння виливка “Кришка передня” в піщано-глинистій формі становить 0,04-0,1 мм/сек, час затвердіння – 2,9 хв, час витримки виливка в ливарній формі до температури вибивки 600 С – 14-15 хв. Розраховано кількість теплоти перегріву, кристалізації і при охолодженні твердого виробу, що відводиться в ливарну форму протягом всього часу перебування виливка у формі. Зазначена можливість оптимізації технологічного процесу виготовлення таких виробів.

Список літератури

1. Хричиков В.Е., Меняйло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. – 89 с.
2. Бялік Г.А., Наумик В.В., Луньов В.В., Пархоменко А.В. Теорія ливарних сплавів. Навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013.–156 с. – ISBN: 978-617-529-068-2.
3. Бялік О.М., Черненко В.С., Писаренко В.М., Москаленко Ю.Н. Металознавство: Підручник. – 2-ге видання, перероб. і доп. – Київ: Політехніка, 2002. – 384 с. – ISBN: 966-622-090-3.
4. Пахаренко В.Л., Марчук М.М. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів (металургія, ливарне виробництво). Навчальний посібник. – Рівне, 2009. – 182 с.
5. Степанов Ю. А., Баландин Г. Ф., Рыбкин В. А. Технология литейного производства. – М.: Машиностроение, 1983. – 287 с.
6. Литье в кокиль / Под ред. А. И. Вейника. – М.: Машиностроение, 1980. – 415 с.
7. Средства и системы автоматизации литейного производства / К. С. Богдан, В. Н. Горбенко, В. М. Денисенко, Ю. П. Каширин. – М.: Машиностроение, 1981. – 287 с.
8. Пельх С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. – К.: Вища школа, 1977. – 188 с.
9. Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
10. Справочник по чугунному литью. Под ред. Н.Г. Гиршовича. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
11. Клименко В.М., Шиліна О.П., Осадчук А.Ю. Технологія конструкційних матеріалів. Ч. II. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 154 с.

12. Москальов І.Н. Ливарні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. – К.: НМК ВО, 1993. – 368 с.
13. А. П. Гуляев. Металоведение. – М.: Машиностроение, 1984. – 545 с.
14. Аралкін А.С. Конструкція і технологія виготовлення ливарних заготовок. Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2010. – 165 с.
15. Пахаренко В.Л., Марчук М.М. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів (металургія, ливарне виробництво) Навчальний посібник. – Рівне, 2009. – 182 с.
16. Немировский Р. Г. Автоматические линии литейного производства. – К.: Выща шк., 1981. – 208 с.
17. Литниково-питающие системы. Конструирование и расчет литниковых систем. Учебное пособие / Л.А. Большаков. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 125 с.
18. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. – М.: Машгиз, 1960. – 436 с.
19. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. М.: Машиностроение, ч. 1, 1976. – 328 с.
20. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 214 с.
21. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. М.: Машиностроение, ч. 2, 1979. – 336 с.