

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: Аналіз та удосконалення технології виготовлення виливків із
алюмінієвих сплавів на основі оптимізації ливникової системи

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

Керівник випускної роботи _____ Кассім Д.О.

Нормоконтролер _____ Кассім Д.О.

Завідувач кафедри _____ Савельєв С.Г.

Кривий Ріг

2024р.

РЕФЕРАТ

до випускної кваліфікаційної роботи на тему:

Аналіз та удосконалення технології виготовлення виливків із алюмінієвих сплавів на основі оптимізації ливникової системи.

Пояснювальна записка: ___ с., ___ табл., ___ рис., ___ джерел.

Об'єкт дослідження: технологічний процес виготовлення виливків із алюмінієвих сплавів.

Предмет дослідження: параметри та конструкція ливникової системи для лиття алюмінієвих сплавів.

Мета роботи: Удосконалення технології виготовлення виливків із алюмінієвих сплавів шляхом оптимізації параметрів і конструкції ливникової системи для підвищення якості продукції та зменшення витрат на виробництво.

Задачі:

- Проаналізувати існуючі технології лиття алюмінієвих сплавів та виявити їх недоліки.
- Оптимізувати параметри та конструкцію ливникової системи для забезпечення якісного заповнення форм та зменшення утворення дефектів.
- Виконати математичне моделювання процесу заповнення форм розплавом для визначення оптимальних умов лиття.
- Провести експериментальні дослідження для перевірки ефективності запропонованих змін та аналізу їх впливу на якість виливків.
- Оцінити економічну доцільність запропонованих змін.
- Оцінити умови праці та безпеки виробничих процесів після впровадження вдосконалень.

Методи дослідження: Аналітичний метод, математичне моделювання, експериментальні дослідження.

Ключові слова:

АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, ЛИТТЯ, ЛИВНИКОВА СИСТЕМА, ОПТИМІЗАЦІЯ, ДЕФЕКТИ ВИЛИВКІВ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, НАПРЯМЛЕНЕ ЗАТВЕРДІННЯ, ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

Зміст

ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. ВИМОГИ ДО ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ І ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОТРИМАННЯ	
1.1. Основні вимоги до виливків з алюмінієвих сплавів.....	
1.2. Класифікація литникових систем для виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів.....	
1.3. Аналіз закономірностей заповнення форм великогабаритних тонкостінних виливків.....	
1.4. Утворення дефектів під час заповнення форм.....	
1.5. Методи розрахунку заповнюваності форм великогабаритних виливків із алюмінієвих сплавів.....	
1.6. Оптимізація заповнення форм розплавом для підвищення якості виливків.....	
РОЗДІЛ 2. Дослідження КРИТИЧНИХ ШВИДКОСТЕЙ ЗАПОВНЕННЯ ПОРОЖНИНИ ФОРМИ ПРИ ЛИТТІ ЛЕГКИХ СПЛАВІВ У ПЩАНО-ГЛИНИСТІ ФОРМИ	
РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ ЛИТНИКОВИХ СИСТЕМ ПРИ ЛИТТІ ЛЕГКИХ СПЛАВІВ	
3.1. Методика проектування та розрахунку виконуваних розмірів нижньої та ярусної литникової системи.....	
3.2. Методика проектування та розрахунку виконуваних розмірів вертикально-щілинної литникової системи.....	
3.3. Розрахунок ярусної системи виливки «Корпус».....	
3.4. Розрахунок ярусної литникової системи для виливки «Корпус».....	
3.5. Розрахунок вертикально-щілинної литникової системи для виливки «Корпус».....	

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....

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

5.1 Характеристика шкідливих і небезпечних факторів.....

ВИСНОВКИ.....

ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА.....

ВСТУП

У сучасному виробництві алюмінієві сплави широко застосовуються завдяки їхній малій вазі, високій міцності та корозійній стійкості, особливо у автомобільній та машинобудівній промисловості. Високі вимоги до якості виливків, їх геометричної точності, міцності та довговічності потребують використання сучасних технологій лиття, які забезпечують мінімізацію дефектів і зменшення витрат на виробництво.

Тема магістерської роботи присвячена аналізу та удосконаленню технології виготовлення виливків із алюмінієвих сплавів на основі оптимізації ливникової системи. Цінність роботи зумовлена необхідністю вирішення проблем, пов'язаних із дефектами, що виникають у процесі лиття, таких як газоусадкова пористість, нерівномірне затвердіння, наявність шлакових включень. Оптимізація конструкції та параметрів ливникової системи дозволяє зменшити вплив цих факторів та покращити властивості готових виробів.

Метою роботи є вдосконалення технології виготовлення виливків із алюмінієвих сплавів шляхом модифікації та розрахунку ливникової системи, що забезпечить підвищення якості продукції і зниження виробничих витрат.

Об'єктом дослідження є технологічний процес лиття алюмінієвих виливків, а предметом – параметри та конструкція ливникової системи. У рамках роботи вирішуються такі завдання:

- Проаналізувати існуючі технології лиття алюмінієвих сплавів та виявити їх недоліки.
- Оптимізувати параметри та конструкцію ливникової системи для забезпечення якісного заповнення форм та зменшення утворення дефектів.
- Експериментальне підтвердження результатів оптимізації.

Запропоновані підходи мають на меті не лише підвищення ефективності технології лиття, але й зменшення екологічного навантаження за рахунок скорочення матеріальних і енергетичних витрат.

РОЗДІЛ 1. ВИМОГИ ДО ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ І ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОТРИМАННЯ

1.1. Основні вимоги до виливків з алюмінієвих сплавів

Ливарні алюмінієві сплави широко застосовуються для відливання середніх і великих навантажених деталей двигунів: корпусів компресорів, картерів, кришок, корпусів різних допоміжних агрегатів, численних патрубків і т.д. У процесі експлуатації такі деталі зазнають високих навантажень, значного надлишкового тиску рідини або газу, підвищених температур, а також впливу агресивних середовищ. Все це помітно підвищує вимоги як до застосовуваних для їх виготовлення сплавів (високі характеристики міцності: короткочасна і втомна міцність, пластичність, щільність), так і, до якості самих відливок, тобто відсутності в них таких дефектів, як пористість, неметалеві включення, ліквіація, вторинні шлакові включення тощо.

При виготовленні виливків, через особливості фізичних та ливарних властивостей, властивих алюмінієвим сплавам найскладніше витримувати вимоги саме за характеристиками міцності та герметичності. Це пов'язано, перш за все, з необхідністю отримання виливків з повною відсутністю дефектів по рихлоті, вторинному шлаку, газоусадкової пористості.

Отримання таких бездефектних виливків можливе лише при точному дотриманні режимів лиття, а саме виборі мінімальної температури заливки та швидкості заповнення порожнини ливарної форми, формуванні температурного поля виливки, що забезпечує спрямоване затвердіння розплаву тощо. Для досягнення цих цілей часто застосовується плавка заливання та кристалізація у вакуумі або середовищі інертного газу, вплив на розплав імпульсним магнітним полем, обробка звуковими або ультразвуковими коливаннями тощо. Проте всі ці заходи можуть принести помітний позитивний ефект лише за умови вибору для кожної конкретної виливки оптимальної конструкції литниково-живильної системи та відповідних параметрів лиття.

1.2. Класифікація литникових систем для отримання виливків із алюмінієвих сплавів

Для отримання виливків із алюмінієвих сплавів застосовуються такі литникові системи (рис. 1.1):

1) бічна литникова система забезпечує заповнення нижньої частини зверху, а верхній частині виливки знизу. Вона зручно виконується у формі, але в початковій стадії заповнення у неї каскадний скидання розплаву у форму, що призводить до окислення, захоплення повітря, утворення піни та замішування її у вилівок;

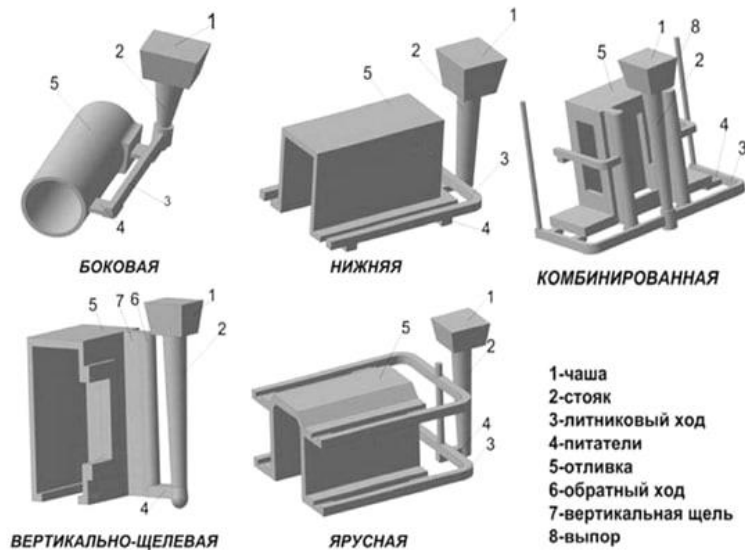


Рисунок 1.1 Основні типи застосовуваних для виливків з алюмінієвих сплавів литникових систем.

2) нижня литникова система найбільшою мірою забезпечує спокійне заповнення порожнини форми, виключає розбризкування і окислення розплаву, добре затримує неметалеві включення, але заповнюваність у неї найнижча, створюється досить багато місцевих перегрівів, що призводить до відсутності спрямованого затвердіння і раковин, а це, у свою чергу, призводить до збільшення розмірів прибутків і рихлеть, особливо в тонких стінках;

3) ярусна литникова система є розвитком нижньої литникової системи, створює сприятливі умови для заповнення форми та затвердження виливка, зберігаючи всі переваги нижньої литникової системи, вона дозволяє забезпечувати послідовну заливку. Недоліком є складність системи та її велика вага, і як наслідок низький коефіцієнт використання металу;

4) вертикально-щілинна литникова система є найбільш ефективною литниковою системою для тонкостінних виливків, зберігаючи всі переваги нижньої і ярусної литникової системою і практично, виключаючи їх недоліки, забезпечуючи спрямоване затвердіння і спокійне пошарове заповнення з мінімальним перегрівом металу, але якщо вилівок має складну конфігурацію, то розташувати вертикальний щілинний живильник важко, особливо в умовах недоліком також є складність відділення виливки від литникової системи. Тому в деяких випадках оптимальним є застосування комбінованої литникової системи.

Усі перелічені литникові системи були розроблені для піщаних форм (табл. 1.1). Деякі з них мають обмежене застосування при литті в кокіль і практично мало застосовні при литті за моделями, що виплавляються.

Таблиця 1.1 Порівняння литникових систем за ефективністю

Тип литникової системи	Нижня система	Ярусна система	Вертикально-щілинна система
Пропускна здатність (кг/с)	5–10	10–15	15–20
Локальні перегриви (°C)	50–70	30–50	≤20
Рівномірність заповнення (%)	60–70	75–85	≥90
Утворення дефектів (%)	12–15	7–10	≤5

Слід зазначити, що найчастіше розрахунок виконуваних розмірів литникових систем ведеться без урахування особливостей протікання процесу заповнення порожнини ливарної форми розплавом, що іноді лише перевіряється за фактом. На думку авторів більш доцільним є інший підхід, а саме спочатку треба забезпечити бездефектне заповнення порожнини ливарної форми, а потім вибрати вигляд і розрахувати розміри литникової системи, що виконуються, які цю заповнюваність забезпечать.

1.3. Аналіз закономірностей заповнення форм великогарабитних тонкостінних виливків

Заповнення порожнини форми перегрітим сплавом – дуже складний фізичний процес, від якого залежить характер наступних стадій формування структури, якості та властивості литого металу. Режим руху розплаву в порожнині форми визначає механізм її заповнення та температурне поле виливки. Характер руху розплаву при заповненні форм дуже складний і залежить від конфігурації порожнини форми, способу підведення металу, напору та інших технологічних факторів/ Як правило, у формі виникають окремі потоки, завихрення. Перерізи, що знаходяться на одному горизонтальному рівні, заповнюються у різний час. Методом фізичного моделювання процесу заповнення форм тонкостінних виливків алюмінієвими сплавами, авторами роботи було встановлено, що останній супроводжується частковим об'ємним затвердінням металу, що призводить до виникнення проточної течії розплаву. До кінця заповнення щілинної порожнини форми ділянки, розташовані нижче рівня живильників, тверднуть повністю, а елементи розташовані вище, зберігають значний перегрів. При заливанні форм чистим алюмінієм, чавуном з малим перегрівом і латунню встановлено, що

при великих швидкостях охолодження розплаву перші порції металу тверднуть на стінках форми поблизу живильника, утворюючи застійні зони; наступні порції проходять між застійними зонами та заповнюють простір над ними. При малих швидкостях охолодження розплаву (піщана форма) перші порції проштотвхуються вперед наступними (на перших стадіях заповнення). У ряді випадків має місце змішання порцій розплаву.

Широкі дослідження заповнення піщаних форм тонкостінних великогабаритних виливків алюмінієвими сплавами були проведені авторами. Ними було встановлено, що заповнення вертикальних щілинних площин при нижньому підведенні металу відбувається за рахунок проточно-поперечної течії розплаву. Детальне експериментальне та математичне дослідження цього виду течії було проведено авторами. Порівняння механізмів заповнення форм великогабаритних тонкостінних виливків і проб на рідкотекучість показало їх суттєву відмінність, що дозволило зробити висновок про неможливість використання результатів, отриманих у пробі на рідкотекучість для оцінки здатності сплаву до заповнення реальних форм.

На думку авторів механізм заповнення порожнини форми має значний вплив на властивості металу виливки. Так міцність на розрив зразків, вирізаних із проточних зон, у середньому на 7–10 % нижча, ніж у зразків, вирізаних із застійних зон (сплав АК12, лиття у піщані форми). Рентгенопросвічуванням виливків типу тонкостінних плит у місцях проточної течії встановлено наявність рихлоти, причому усунення цього дефекту можна застосуванням керованих багатоярусних та вертикально-щілинних литникових систем; це також сприяє формуванню щільнішої структури виливків внаслідок спрямованого затвердіння.

Підвищенню механічних властивостей виливків з легких сплавів сприяють також використання оптимальних, з точки зору відсутності утворення вторинних шлаків та відсутності «неспаїв» та «неслитин», швидкостей заповнення піщаних форм розплавом та застосування розосередженого підведення металу в порожнину. При заповненні тонкостінних горизонтальних порожнин форм переважає невпорядкований рух розплаву навіть при щільному підведенні металу по всій ширині порожнини. У початковий час конфігурація фронту потоку спотворюється і внаслідок пульсації швидкостей розплав тече окремими мовами – виступами. В результаті ланкою заповнення, що лімітує, є процес злиття потоків без утворення у виливку дефектів типу «спаїв» і «неслитин».

Роботами доведено, що механізм заповнення порожнини форми великогабаритного тонкостінного виливка та механізм зупинки потоку розплаву в ній залежить від особливостей кристалізації сплаву. Для евтектик і металів високої чистоти характерне намерзання твердих скорин на стінки

каналу. Так при литті алюмінію (чистота 99,99%) у піщані форми при всіх перегрівих на поверхні форми утворюється кірка твердого металу; при перегріві менше 60 К вона продовжує зростати, від 60 до 100 К розплавляється частково, понад 100 К повністю розплавляється.

Для сплавів, що твердіють при інтенсивному охолодженні, потік зупиняється швидше (внаслідок збільшення швидкості зростання дендритів), ніж у разі чистого алюмінію. У сплавів, що твердіють у широкому інтервалі температур, потік зупиняється за рахунок накопичення твердої фази в його головній частині. За Флемінгом для зупинки потоку достатньо 15 – 20 % твердої фази. Однак, критична кількість твердої фази залежить від властивостей сплаву, інтенсивності тепловідведення та умов лиття і може коливатися від 5 (для титанових сплавів) до 30% (для алюмінієвих сплавів).

За даними Г. Ф. Баландіна при охолодженні потоку розплаву нижчої температури ліквідусу з'являється тверда фаза і виникає відповідна структура його головної частини. Потік зупиняється, коли межа міцності структури, що утворилася, залежить від кількості твердої фази, стане рівною натиску. Можливий також послідовний характер затвердіння сплавів із широким інтервалом температур кристалізації за наявності місцевих опорів, які сприяють прилипанню кристалів до стінок каналу та зростання коронки. Ряд дослідників пов'язують механізм зупинки потоку з утворенням твердої скоринки в його головній частині, здатної витримати гідростатичний напір розплаву. Процес має пульсуючий характер, тому що одночасно відбуваються і заморожування скоринки та її часткове розплавлення. Можливий, ймовірно, механізм зупинки потоку, який полягає в тому, що зважені кристали закупорюють вузький перетин, утворений скоринками.

Всі дані з причин зупинки потоку розплаву були отримані при дослідженні заповнення проб на рідину. Механізм зупинки потоку за умов одномірного течії можна наступним чином. У початковий момент заповнення порожнини форми потоці розплаву виникає перепад температур. При досягненні поверхнею потоку температури ліквідусу на стінках форми починається кристалізація (ймовірність заморожування вище у сплавів з вузьким інтервалом температур кристалізації в умовах інтенсивного теплообміну). Окремі тверді частинки, що виділяються на межі метал-форма, утворюють рухливу головну частину потоку з двофазного (рідко-твердого) сплаву, що прискорює процес затвердження потоку по всьому об'єму. Зупинка потоку відбувається, коли його фронт охолоджується до температури нульової рідини. Якщо умови заповнення відповідають утворенню твердої кірки на стінках каналу, після досягнення поверхнею потоку температури кристалізації (затвердіння) розплав тече в твердій оболонці; кірка за певних умов може оплаватися і руйнуватися під впливом потоку. Швидкість її зростання

зменшується і в потоці з'являються області твердої фази. У цьому випадку потік зупиняється як за рахунок наморожування кірки, так і в результаті процесів, що відбуваються в головній частині потоку.

А. І. Вейніком запропоновано критерій для визначення механізму зупинки потоку розплаву:

$$K = \frac{\Delta T_{кр}}{\delta_1 T} = \frac{T_l T_c}{T_{1ц} T_{1п}}, \quad (1.1)$$

де T_l , T_c - температури ліквідусу і солідус сплаву, К;

$\delta_1 T$ – перепад температури у перерізі потоку, К;

$T_{1ц}$, $T_{1п}$ – температури в центрі і на поверхні потоку відповідно, К.

– При $K \ll 1$ за рахунок перехоплення каналу скоринками, що намерзають;

– При $K \gg 1$ за рахунок накопичення твердої фази в носіку потоку;

– При $K \approx 1$ ймовірність обох причин приблизно однакова.

Залежно від механізму зупинки потоку в порожнині форми вибирається відповідна методика розрахунку заповнюваності форми та виконуваних розмірів литникових систем.

1.4. Утворення дефектів під час заповнення форм

Характерними дефектами, що утворюються внаслідок охолодження металу та передчасної зупинки потоку, є спаї та неслітини. Порушуючи суцільність поверхні виливки, спаї знижують міцність та погіршують макроегеометрію литого виробу. А. А. Неустроев та Г. Л. Ходоровський розділили всі спаї на два види:

а) спаї 1-го роду - поздовжні, поперечні, корольки;

б) спаї 2-го роду - складки та розшарування.

Спаї 1-го роду характерні для струменевого заповнення порожнини форми, коли злиття двох зустрічних потоків або потоку та застійної зони відбувається не по всій поверхні, а лише по тій частині, яка має достатню для цього температуру. Умовами утворення спаїв 1-го роду є:

1) утворення поверхні розділу між рідкою та твердою фазами;

2) існування поверхні розділу до моменту, коли температура на її певній частині стане нижчою за деяку мінімальну, при якій ще відбувається злиття або зварювання потоків;

3) наявність перепаду температури по перерізу потоку, достатнього для накладання трьох стадій формування виливки: течії металу, відведення теплоти перегріву та затвердіння.

Перша умова визначається гідродинамічними, а друга та третя – тепловими явищами, що супроводжують процес формування виливки.

Спаї 2-го роду формуються в умовах, коли при затвердінні виливки виникає велика нерівномірність швидкості намерзання твердої кірки, внаслідок чого відбувається оплавлення та змив окремих кристалів, їх часткове або повне заповнення в металі. Основними причинами утворення спаїв 2-го роду є порушення суцільності потоку (особливо при горизонтальному положенні порожнини форми), значна довжина шляху металу від живильників до окремих частин форми і передчасне його охолодження при порівняно низькій температурі форми. Дослідження, проведені на сплаві АК12, показали повне злиття потоків поблизу стояка, за наявності спаїв у більш віддалених зонах, а також сильний вплив температури потоку, що набігає. Це дозволило зробити висновок про основну роль теплових процесів у механізмі утворення спаїв. Очевидно, злиття відбувається тільки в тому випадку, якщо вторинний потік, що набігає, має достатній перегрів для повного «обтікання» меніска нерухомого розплаву і оплавлення утвореної на поверхні меніска твердої фази. А. Р. Рабінович запропонована емпірична формула, для визначення часу злиття тел набігаючого потоку і застійної зони, що гарантує відсутність а виливках дефектів типу спаїв:

$$t_{\text{сл}} = \frac{Al_0^2}{3600} \left(\left(\frac{\theta_{\text{н}}}{\theta_{\text{кр}}} \right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

де A – постійна, яка залежить від теплофізичних характеристик форми металу та оксидних полон на його поверхні, с/м^2 ; l_0 – наведений розмір виливки, м. $l_0 = S/P$, де S – площа перерізу потоку, нормальна до напрямку руху потоку розплаву, а P – змочений периметр потоку; $\theta_{\text{н}}$, $\theta_{\text{кр}}$ – температури набігаючого потоку та кристалізації сплаву, що відраховуються від початкової температури форми, K .

А. І. Вейник наводить рішення задачі про зварюваність окремих крапель зі струменем металу, що можливо за умови подолання поверхневого натягу краплі силою струменя і наголошує на значенні теплових процесів у зоні контакту. А. А. Неструєв і В. В. Чистяков для оцінки освіти у виливках дефектів типу спаїв і неслітин пропонують наступний критерій, названий ним критерієм ливарного зварювання потоків або потоку та застійної зони:

$$K_{\text{СВ}} = \sqrt{\frac{C_{\text{еф1}}}{C_{\text{еф2}}}} \cdot \frac{[T_{1\text{ц}} - (1+K_{\text{T}}) \cdot T_{\text{СВ}}]}{[(1+K_{\text{T}}) \cdot T_{\text{СВ}} - T_{2\text{ц}}]} \geq 1, \quad (1.3)$$

Де $C_{\text{эф}} = C_{\text{ср}} + \frac{q_{\text{кр}}}{T_{\text{л}} - T_{\text{с}}}$; $C'_{\text{эф}1}$, $C'_{\text{эф}2}$ – ефективні значення питомої теплоємності поверхневих шарів потоків, Дж/кг·К; $T_{1\text{ц}}$, $T_{2\text{ц}}$ – температури центрів головної частини потоку та застійної зони до їх зустрічі, К; $K_{\text{т}}$ – температурний критерій потоку; $T_{\text{св}}$ – температура зварюваності потоків, До.

В цей критерій входить температура $T_{\text{св}}$, що включає параметр m – відносну кількість твердої фази, при якому потік обтікає меніск застою та зварюється з ним. Рекомендується інтервал значень $m=0,2\div 0,6$. Для алюмінієвих сплавів ця величина потребує уточнення. На відміну від руху розплаву в литникових каналах, що характеризується турбулентним режимом і великим числом Рейнольдса (Re), заповнення порожнини форми відбувається при низьких швидкостях і малих значеннях Re . Експериментальними дослідженнями забруднення виливків, з алюмінієвих сплавів, залежно від ступеня турбулентності потоку в порожнині форми, встановлено, що вторинне шлакоутворення виключається у виливках простої конфігурації при $Re \leq 780$. Дослідження струменя розплаву, у поверхню металоприймача, показали, що на процес піноутворення в алюмінієвих сплавах крім критерію Re впливає критерій Вебера (We). Для визначення гранично допустимих швидкостей перебігу розплаву у формі запропоновано критерій бездефектного заповнення:

$$K_{\text{и}} = K_1 \cdot W^2 \cdot l_0, \quad (1.4)$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує вплив характеристик сплаву, що входять у критерій Re та We , а також фізико-хімічні властивості оксидної плівки та шорсткість поверхні форми (для сплавів АМ4,5Кд та АК7ч $K_1 = 1 \text{ с}^2/\text{см}^3$); W – швидкість струменя металу, м/с; l_0 – наведений розмір струменя, м.

Для виливків з підвищеними вимогами щодо герметичності та щільності $K_{\text{и}} \leq 2400$. При дослідженні процесів заповнення порожнин форм та утворення дефектів на стадії заливання широко використовують теорії подібності та розмірів. Так, для лиття в піщані форми, запропоновано метод оцінки ймовірності виникнення дефектів, що полягає у послідовному визначенні критеріїв, що включають кількість сполучного, вологості та щільності формувальної суміші, температуру заливання розплаву. Розроблені критерії заповнюваності форми, що враховують геометричні параметри каналу, час і швидкість руху рідкого металу.

1.5. Методи розрахунку заповнюваності форм великогабаритних виливків із алюмінієвих сплавів

Існуючі методи розрахунку заповнюваності форм можна умовно поділити на чотири групи:

1) Емпіричні, що є результатом статистичної обробки експериментальних та виробничих даних.

2) Теоретичні, розроблені на основі використання в якості вихідної моделі перебігу розплаву в пробах на рідину або на основі використання законів гідравліки.

3) Теоретичні та напівемпіричні, що враховують у тій чи іншій мірі специфіку заповнення робочих порожнин форм.

4) Чисельне моделювання на ЕОМ.

До першої групи належать відомі формули типу $t = S \cdot G^m \delta^n$, що відображають залежність часу заповнення форми t від ваги вилівка G та товщини її стінки δ . Часто рекомендується значення $m = n = 1/3$; величина коефіцієнта S визначається експериментально і включає багато технологічних параметрів: умови заливання, температуру розплаву і т.д.

Для визначення часу заповнення форми використовують також допустиму швидкість підйому рівня металу в порожнині. Б. В. Рабінович ввів градацію середньої вагової швидкості заливки в залежності від конфігурації вилівки: швидке, нормальне і сповільнене.

Поняття критичної (мінімально допустимої) швидкості підйому рівня металу, що гарантує відсутність «спаїв» і «неслитин» у вилівку. У роботах, присвячених визначенню критичних швидкостей для різних металів, наведено емпіричні формули для їх розрахунку в залежності від висоти вилівки h_k .

Для лиття алюмінію та його сплавів у піщані форми:

$$\omega = \left(\frac{h_k}{2,09 \cdot \delta - 4,2} \right)^{1,25} \quad (1.5)$$

(температура заливання 1003) [75];

$$\omega = 0,218 \cdot \frac{\sqrt{h_k}}{\delta \cdot \ln\left(\frac{T_{зал}}{381}\right)} \quad [78] \quad (1.6)$$

Розроблена номограма для визначення простих горизонтальних порожнин форм залежно від довжини вилівки і температури сплаву, що заливається. Однак, можна констатувати, що методи розрахунку процесу заповнення, що стосуються першої групи, мають оціночний характер і малопридатні для великогабаритних тонкостінних вилівоків.

Аналіз виробничих даних з наступною статистичною обробкою дозволив В. Д. Топорову вивести формули для лиття різних за конфігурацією вилівоків з магнієвих сплавів:

– для вилівоків, що заливаються у піщані форми через нижні литникові системи:

$$\lg \omega_{\min} = 1,7405 - 0,3338 \lg V - 0,3736 \lg \delta_{отл} + 0,9277 \lg h_{отл}; \quad (1.7)$$

– для виливків, що заливаються в піщані форми через вертикально-щілинну та ярусну літникові системи:

$$\lg \omega_{\min} = 1,9774 - 0,4083 \lg V - 0,4105 \lg \delta_{\text{отл}} + 1,0263 \lg h_{\text{отл}}; \quad (1.8)$$

– для виливків, що заливаються в металеві форми через нижню літникову систему:

$$\lg \omega_{\min} = 1,874 - 0,3924 \lg V - 0,393 \lg \delta_{\text{отл}} + 1,0391 \lg h_{\text{отл}}; \quad (1.9)$$

– для виливків, що заливаються в піщані форми через вертикально-щілинну та ярусну літникові системи:

$$\lg \omega_{\min} = 1,8059 - 0,4146 \lg V - 0,1515 \lg \delta_{\text{отл}} + 0,9194 \lg h_{\text{отл}}, \quad (1.10)$$

де V - об'єм виливка, мм³;

$\delta_{\text{отл}}$ - середня товщина стінки виливки та прибутку, мм;

$h_{\text{отл}}$ - висота виливки, мм.

Для розрахунку мінімально допустимої швидкості запропоновано регресійні моделі:

$$\omega_{\min} = 5,03 - 0,64165 \frac{h_{\text{отл}}}{1,542 + 0,8475 \cdot \delta_{\text{отл}}} + 0,00514 \left(\frac{h_{\text{отл}}}{1,542 + 0,8475 \cdot \delta_{\text{отл}}} \right)^2, \quad (1.11)$$

$$\omega_{\min} = 12,11 - 0,04931 \frac{h_{\text{отл}}}{\sqrt[3]{\delta_{\text{отл}} \cdot G}} + 0,001468 \left(\frac{h_{\text{отл}}}{\sqrt[3]{\delta_{\text{отл}} \cdot G}} \right)^2, \quad (1.12)$$

де $\delta_{\text{отл}}$ - середня товщина стінки виливки та прибутку, мм; $h_{\text{отл}}$ - висота виливка, мм; G – маса металу, що заливається у форму, кг.

Наведені формули застосовуються для розрахунку фасонних алюмінієвих виливків масою $G \leq 8$ кг.

Теоретичні методи розрахунку процесів заповнення (друга група) розроблені для непротяжних виливків, коли заповнення здійснюється одновимірним потоком і розрізняються, в основному уявленнями про механізм зупинки потоку, характером теплообміну між потоком розплаву і формою, що виражається коефіцієнтом тепловіддачі і т. д. Так, для лиття в пісочні форми, А. І. Вейник пропонує формулу для визначення часу t досягнення в потоці заданої температури θ_1 :

$$t = \frac{\sqrt{\pi} \sqrt{\tau_0 \cdot c \cdot \rho} \cdot l_0}{b\phi} \cdot \ln \frac{\theta_{\text{зал}}}{\theta_1} + t_0, \quad (1.13)$$

де $\theta_{\text{зал}}$ - надмірна температура заливки; t_0 – час перебігу металу до розглянутого (нерухомого) перерізу форми.

У разі намерзання твердої кірки на поверхні каналу з урахуванням зміни швидкості потоку отримано:

$$t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_T \cdot b \cdot \phi \cdot l_0 \cdot q_{кр}}{\alpha \cdot \theta_{кр}} + t_1, \quad (1.14)$$

де $t_1 = \frac{c \cdot \rho \cdot \delta}{\alpha} + \ln \frac{\theta_{зал}}{\theta_{кр}}$, час перебігу розплаву на початок освіти кр твердої кірки;
 δ – наведений розмір, м.

Ряд дослідників вважають, що заповнення форми можна вважати якісним, якщо до кінця заливки метал зберігає мінімальну температуру перегріву.

До третьої групи можна віднести методи розрахунку процесу заповнення. Згідно з тривалістю заливки, щоб уникнути спаїв та неслититин, не повинна перевищувати 1–3 % від часу повного затвердження відливання. Час заповнення масивної виливки вагою G :

$$t = 1,35 \cdot G^{5/12} \quad (1.15)$$

А тонкостінного виливка, що заливається через литник такої ж товщини як стінки виливки:

$$t = 1,0 \cdot G^{5/12} \quad (1.16)$$

Г. Ф. Баландіним запропоновано розглядати час заливання за формулою:

$$t = 3,6 \cdot G^{0,4} \quad (1.17)$$

В [38] запропоновано час заповнення визначати за формулою:

$$t = S \cdot \delta^m + K \quad (1.18)$$

В (1.18) не враховано освіження головної частини потоку внаслідок нерівномірного розподілу швидкостей по течії каналу, природної конвекції та скидання охолодженого розплаву у різноманітні поглиблення. У зв'язку з цим автор рекомендує використовувати пошаровий метод розрахунку, що дозволяє враховувати конфігурацію виливка. Однак, він обґрунтований тільки для заповнення порожнини металом зверху, коли гарячий розплав безперервно надходить на дзеркало металевої ванни.

Б. В. Рабінович відзначає певні протиріччя між формулами емпіричними та теоретичними.

З урахуванням однотипної конфігурації гребних гвинтів запропоновано графоаналітичний метод визначення швидкості підйому рівня металу у формі, при заливанні через різні литникові системи. Метод дозволяє визначати оптимальні умови заливання форм для заповнення різних ділянок, яким

характерні значні коливання швидкостей. Методи розрахунку процесу заповнення, розроблені засновані на тому, що головна частина потоку послідовно проходить по всіх ділянках форми зі швидкостями, визначеними з умов сталості витрати. Коефіцієнт тепловіддачі від фронту потоку прийнято постійним; значення його визначають з проби на рідину і виводять формулу, що дозволяє знайти мінімальне значення рідини, що гарантує якісне заповнення форми. Схеми механізму заповнення відповідають механізму заповнення одновимірним потоком.

Метод розрахунку заповнюваності форм протяжних великогабаритних виливків в умовах проточно-поперечної течії розплаву розроблено в, де отримано формулу для визначення температури фронту потоку $T_{\text{п}}$ (без намерзання твердої кірки на поверхні форми в зоні потоку):

$$K_{\text{T}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \{K \cdot l_0 [K_{\text{T}} - \ln(1 + K_t)]\} \quad (1.19)$$

$$K_{\text{T}} = \ln \frac{T_{\text{зал}} - T_{\text{фн}}}{T_{\text{п}} - T_{\text{фн}}} - \text{критерій температури};$$

$$K_{l_0} = \frac{b_{\text{ф}}^2}{(N-1) c \cdot \rho \cdot l_0} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_0} + \frac{1}{\beta} \right) - \text{критерій товщини стінки виливки};$$

$$K_t = \frac{\sqrt{\pi} \sqrt{l}}{b_{\text{ф}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{м}}} + \frac{1}{\beta} \right)} \cdot \sqrt{\frac{N-1}{n}} - \text{критерій гомохромності};$$

$$N = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{B}{\sum B_{\text{пр}}} - \text{критерій кратності осьового масообміну},$$

де ω - термічна провідність покриття; $\alpha_{\text{м}}$ – коефіцієнт тепловіддачі

металу; B – ширина виливки; $\sum B_{\text{пр}} = (0,1 - 0,2)B$ – сумарна ширина проточних зон.

Максимально можлива умовна довжина поперечного розтікання визначається з виразу:

$$Z_{\text{max}} = 0,25 g \cdot \left(\frac{c \cdot \rho \cdot l_0}{\beta} \ln \frac{T_1 - T_{\text{фн}}}{T_{\text{кр}} - T_{\text{фн}}} \right)^2, \quad (1.20)$$

де T_1 – температура металу на виході із потоку.

У запропонованому методі розрахунку не враховується тепловіддача до застійних зон, відсутня оцінка ширини проточних зон, що надають значний вплив на інтенсивність масообміну. Практично $N = B / \sum B_{\text{пр}} = 5$, однак цей висновок не поширюється на випадок зосередженого підведення металу в порожнину форми. Запропоновано приймати ширину проточної зони рівної ширині каналу, що підводить.

Розрахунок заповнення тонкостінних виливків можна вести за формулою:

$$\frac{L}{q} \leq - \frac{h-t_{\text{сл}}}{1 + \frac{A\alpha}{c-\rho \cdot l_0} \cdot \frac{\theta_{\text{зал}}}{\text{кр}}}, \quad (1.21)$$

де L – довжина шляху, пройденого у формі металом до зустрічі із застійною зоною; q – об'ємна витрата живильника; $t_{\text{сл}}$ – час охолодження застійної зони, що гарантує повне злиття з потоком (без спаїв та неслітин); A – постійна, яка залежить від властивостей сплаву та форми. При заповненні панельних виливків із легких сплавів встановлені середні швидкості течії металу: 0,4 – 0,6 м/с. Розрахувати температуру розплаву в зоні протікання можна за рівнянням:

$$v = v_{\text{зал}} \left[1 - \frac{2 \cdot b_{\phi}}{\sqrt{\pi} \cdot c \cdot \rho \cdot l_0} (\sqrt{t_{\text{зал}}} - \sqrt{t_{\text{зал}} - t_c}) \right], \quad (1.22)$$

де t_c - час перебігу розплаву до аналізованого перерізу каналу; $t_{\text{зал}}$ - час заливання.

Для розрахунку процесу заповнення необхідно знати величину коефіцієнта тепловіддачі від потоку металу у формі α . Формули визначення α різні, що з конкретними режимами течії металу, умовами теплообміну тощо. буд. При лиття в піщані форми використовують формулу:

$$\alpha = \frac{b_{\phi}}{\sqrt{\pi} \sqrt{t}} \quad (1.23)$$

Однак згідно (1.23) безпосередньо на фронті потоку $t = 0$ і $\alpha \rightarrow \infty$, що не відповідає дійсності. А. І. Вейник рекомендує для головної частини потоку застосовувати ефективне значення коефіцієнта тепло-віддачі, що перебуває з досвіду. Щоб усунути протиріччя (1.23), в результаті аналізу процесу теплообміну через поверхню розділу метал-форма зроблено припущення, що знаменник (1.23) не стає меншим за деяку постійну t_0 , що має розмірність часу, зазначено орієнтовне її значення, обумовлене термічним опором контакту метал-форма. Так, для силуміну при 700 – 800 °С, що заливається у піщані форми, $t_0 = 1 - 2$ с. Автори вважають, що величина t_0 залежить від термічних опорів потоку металу $2l_0/\lambda$ та контакту метал-форма $1/\beta$. Проте розрахунок t_0 утруднений необхідністю експериментального її визначення кожному за випадку лиття. Тому доцільно вести розрахунок α , використовуючи теорію конвективного теплообміну.

У роботах Г. М. Дубицького та Б. С. Чуркіна ентальпійним методом було визначено коефіцієнти тепловіддачі за різних умов заливання піщаних форм алюмінієм, вісмутом свинцем. Експериментально встановлено, що:

при $Re < 50$; $Nu_{\delta_{\text{Ж}}} = 1$ коефіцієнт тепловіддачі, $Nu_{\delta_{\text{Ж}}}$, практично не залежить від $Re_{\delta_{\text{Ж}}}$;

при $Re_{\delta_{\text{Ж}}} = 50 \dots 400$,

$$Nu_{\delta_{\text{Ж}}} = 0,033 \cdot Re_{\delta_{\text{Ж}}}^{0,82} \quad (1.24)$$

При дослідженні теплообміну в рідких металах та їх теплової взаємодії з навколишнім середовищем, залежність $Nu_{\delta Ж}$ від $Re_{\delta Ж}$, як правило, виражають у вигляді:

$$Nu_{\delta Ж} = A + B \cdot Re_{\delta Ж}^n,$$

де A , B , n – визначають з експериментальних даних.

Так, при турбулентному перебігу рідкого металу в кільцевих каналах:

$$Nu_{\delta Ж} = 4,6 + 0,014 \cdot Re_{\delta Ж}^{0,8} \quad (1.25)$$

при постійному градієнті температури на стінці каналу:

$$Nu_{\delta Ж} = 7 + 0,025 \cdot Re_{\delta Ж}^{0,8} \quad (1.26)$$

при постійній температурі на стінці форми:

$$Nu_{\delta Ж} = 5 + 0,025 \cdot Re_{\delta Ж}^{0,8} \quad (1.27)$$

Для тришарової теплової схеми потоку та постійного тепловідведення:

$$\text{при } Re_{\delta Ж} > 10 \quad Nu_{\delta Ж} = 7,8 + 0,003 Re_{\delta Ж}^{0,8} \quad (1.28)$$

$$\text{при } Re_{\delta Ж} > 200 \quad Nu_{\delta Ж} = 5,8 + 0,022 Re_{\delta Ж}^{0,8} \quad (1.29)$$

У початковий момент часу зіткнення потоку розплаву, навіть із піщаною формою, інтенсивність теплообміну настільки велика, що на поверхні утворюється тверда кірка. Г. Ф. Баландін рекомендує розраховувати конвективний коефіцієнт тепловіддачі від розплаву до кірки за формулою:

$$\alpha_k = \alpha'_k + c \cdot \omega^p, \quad (1.30)$$

де α'_k – коефіцієнт теплообміну розплаву із затвердуювальною кіркою при заморожуванні в потоці; c , p – постійні для сплаву.

Інтенсивність охолодження потоку, що рухається, визначається не стільки теплоакумулюючою здатністю форми, скільки величиною фактичної поверхні зіткнення, яка залежить від зернового складу суміші або покриття, ступеня змочування і термічного опору газового прошарку. Так встановлено, збільшення рідинної алюмінієвих сплавів при використанні покриттів (гіпс, гексохлоретан і т. д.).

Отже, вибір формули розрахунку α повинен відповідати умовам лиття, т. е. кожної конкретної форми (цехові умови лиття) необхідні експериментальні дослідження.

Питання заповнюваності форми настільки складне, що можна погодитися з автором робіт про прийняття наступних постулатів:

1) Використовувати наведений розмір виливка, тому що за час заповнення відводиться лише частина теплоти перегріву, яка зазвичай становить 15 – 20 % від температури ліквідусу сплаву.

2) За наявності стінки виливки товщиною понад 4 мм витрати на подолання тертя в порожнині форми незначні, і їх можна знехтувати.

1.6. Оптимізація заповнення форм розплавом для підвищення якості виливків

Слід зазначити, що проблема оптимізації параметрів лиття є дуже складною. Для її вирішення використовуються два підходи:

1. Перший підхід, у якому досліджуваний об'єкт представляється як «чорного ящика», спирається на апарат математичної статистики, теорії розпізнавання образів і кібернетики.

2. Другий, активний, підхід до проблеми оптимізації ґрунтується на ретельному вивченні процесів, що відбуваються на всіх стадіях формування виливка, моделювання їх з використанням фізичних моделей та ЕОМ. При цьому можна сформулювати різні критерії, які можуть бути мірою оптимальності конкретних фізичних процесів. У цьому випадку завдання оптимізації полягає у підтримці оптимальних значень критеріїв, що може виражатися у вигляді вимог мінімальності деяких цільових функцій, які залежать від параметрів керування (швидкості заливки, інтенсивності теплообміну, зовнішніх впливів тощо).

Другий підхід має гнучкість і може бути використаний при аналізі нових технологій та способів лиття. Однак слід пам'ятати, що оптимізація за критеріями якості – це визначення не оптимальних, а, по можливості, раціональних параметрів технології лиття.

В даний час одним з кращих рішень, в якому враховані і гідродинамічні характеристики перебігу рідкого металу, і його охолодження при цьому, і якість майбутнього виливка, є пропозиція В. В. Чистякова про виділення так званої області заповнюваності, що ґрунтується на критерії оцінки процесу. Критерії якості отримані при теорії подібності та розмірностей (метод узагальнених змінних) і дозволяють виділити область заповнюваності для будь-якого виливка з будь-якого сплаву.

Необхідно відзначити, що в останні роки в результаті розвитку теорії ливарних процесів було розроблено та впроваджено у виробництво автоматизовані системи моделювання ливарних процесів, такі як Magma, Procast, а також LVM Flow-3D та ПОЛІГОН, які активно впроваджуються у виробництво. Однак, слід констатувати, що застосування системи автоматизації виробництва за допомогою комп'ютера для аналізу процесів, що

протікають при формуванні виливки, і проектування технології лиття виливків з алюмінієвих сплавів для авіаційних газотурбінних двигунів не вирішило проблеми підвищення їх якості і не зменшило термінів технологічної підготовки виробництва. Це зумовлене нестачею даних за теплофізичними характеристиками сплавів і ливарних форм, що застосовуються, в інтервалі температур заливки та кристалізації та відсутністю взаємозв'язків між параметрами лиття та причинами виникнення основних видів дефектів. Відсутність рекомендацій щодо призначення початкового варіанту лиття призводить до істотного збільшення витрат часу на моделювання процесів і підвищує вимоги (обсяг оперативної пам'яті та швидкодія) до застосовуваних електронно-обчислювальних машин.

Таким чином, незважаючи на значні успіхи в галузі моделювання ливарних процесів та створення досить потужних інструментів для їх чисельного аналізу, системи моделювання мають низку істотних недоліків. Більше того, питання вибору оптимальних режимів заповнення форми розплавом, що визначають основні параметри заливки: швидкість підведення розплаву у форму, температуру заливки та форми і, нарешті, розміри литникової системи – вирішені значно гірше. У зв'язку з цим виникає потреба створення методів проектування литникових систем та математичних моделей для вирішення конкретних завдань з урахуванням специфічних особливостей ливарних процесів з метою підвищення якості литих виробів та ефективності технологічної підготовки виробництва на початковій стадії проектування.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ШВИДКОСТЕЙ ЗАПОВНЕННЯ ПОРОЖНИНИ ФОРМИ ПРИ ЛИТТІ ЛЕГКИХ СПЛАВІВ У ПЩАНО-ГЛИНИСТІ ФОРМИ

Як показує аналіз діяльності ливарних цехів, переважна кількість дефектів, що виявляються у виливках на стадії контролю, виникають на двох стадіях формування виливки: заповнення порожнини форми розплавом та затвердіння. Основними причинами появи дефектів є: помилки в конструкції литниково-живильної системи, неправильний вибір параметрів заливки, порушення технології плавлення та лиття.

Як правило, дефекти, що особливо виникають на стадії заповнення порожнини форми розплавом, є не виправними, тому дуже важливо вже на ранній стадії проектування знати, які з них можуть виникнути в даному конкретному виливку, щоб вже на стадії розробки технологічного процесу лиття та виготовлення оснастки виключити причини їхньої появи.

На характер перебігу розплаву каналами литникової системи та ливарної форми істотно впливає їх конструкція. Фасонні виливки, що виготовляються в ливарних цехах, різняться за конфігурацією настільки, що реальної обґрунтованої параметричної класифікації поки не існує, а її розробка дозволила б встановити логічні вирішальні правила проектування литниково-живильної системи, виявити найбільш вірогідні причини появи дефектів, характерні відливок, а отже, застосувати при проектуванні оптимальну методику розрахунку литникової системи та помітно скоротити рівень дефектів та час, що витрачається на технологічну підготовку виробництва.

Для опису конфігурації виливка можна скористатися параметричними критеріями подібності, складеними з використанням схеми, наведеної на рис. 2.1.

$$1) A \equiv \frac{a}{\delta}; \quad B \equiv \frac{b}{\delta}; \quad H \equiv \frac{h}{\delta},$$

де a – ширина елемента,

b – довжина елемента,

h – висота елемента,

δ – товщина стінки.

$$\delta \leq 0,012$$

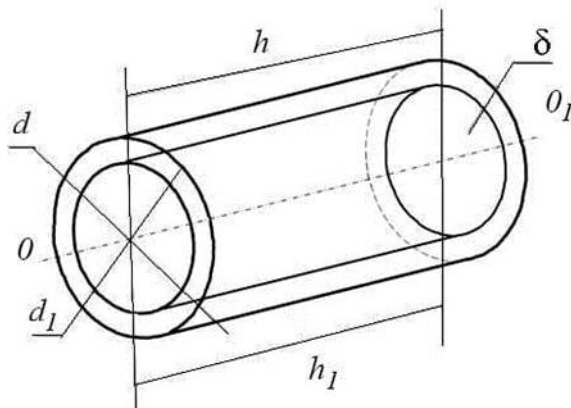
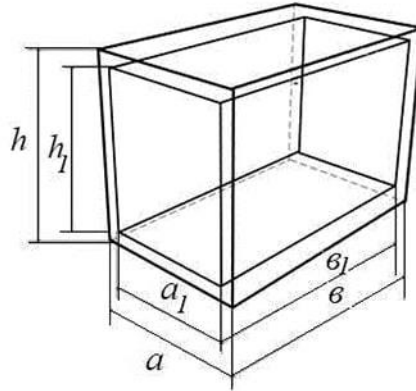
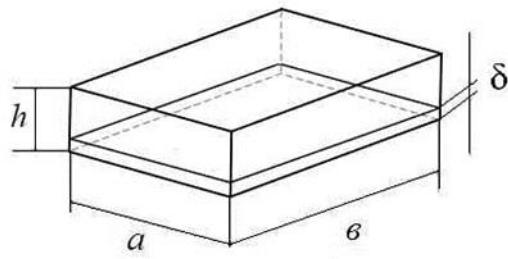


Рисунок 2.1 Схеми елементів великогабаритних тонкостінних виливків

а) горизонтальна плита

$$A \gg 1; B \gg 1; H \approx 1;$$

б) вертикальна плита

$$A \gg 1; B \approx 1; H \gg 1;$$

$$2) 1) A' \equiv \frac{a'}{\delta}; \quad B' \equiv \frac{b'}{\delta}; \quad H' \equiv \frac{h'}{\delta},$$

де a' – ширина елемента,

b' – довжина елемента,

h' – висота елемента.

Обечайки:

$$A \gg 1; A' \gg 1; B \gg 1; B' \gg 1; H' \gg 1; H \gg 1;$$

$$A - A' = 2 \cdot \delta; B - B' = 2 \cdot \delta; H - H' = 0;$$

$$A - A' = 0; B - B' = 2 \cdot \delta; H - H' = 2 \cdot \delta;$$

$$A - A' = 2 \cdot \delta; B - B' = 0; H - H' = 2 \cdot \delta;$$

Кришки:

$$A \gg 1; A' \gg 1; B \gg 1; B' \gg 1; H \gg 1; H' \gg 1;$$

$$A - A' = 2 \cdot \delta; B - B' = 2 \cdot \delta; H - H' = \delta;$$

$$3) \quad D \equiv \frac{d}{\delta}; D' = \frac{d'}{\delta};$$

$$H \equiv \frac{h}{\delta}; H' = \frac{h'}{\delta}$$

де d – діаметр виливки,

d' – діаметр внутрішньої порожнини виливка,

00_1 – вісь обертання.

Втулки:

а) горизонтальні

$$D \gg 1; D' \gg 1; D - D' \gg 1; H \parallel 00_1;$$

б) вертикальні

$$D \gg 1; D' \gg 1; D - D' = 2 \cdot \delta; H \perp 00_1$$

Вплив геометричної форми виливки на ймовірність появи дефектів неодноразово зазначався у дослідженнях, що проводилися різними авторами, зокрема у роботах. Різні ребра, повороти, бобишки викликають обурення, штучну турбулізацію потоку та захоплення повітря з утворенням «вторинного шлаку», а отже, і забруднення виливка. Безпосереднє візуальне дослідження процесу перебігу розплаву в робочій порожнині ливарної форми, на думку авторів найбільш доцільно проводити методами фізичного моделювання на прозорих моделях та холодних рідинах на основі теорії подібності та розмірностей. Тому було обрано наступну схему проведення досліджень:

1) Фізичне моделювання процесу з метою виявлення параметрів, суттєвих для оцінки «гідравлічної складності» порожнини форми.

2) Упорядкування функціональної залежності.

3) Обробка даних з використанням теорії розмірностей та π -теореми.

4) Визначення чисельних значень критеріїв подібності.

Вплив зміни порожнини форми на ступінь турбулізації потоку вивчали на прозорих моделях з розмірами робочої порожнини: довжина 800 мм, ширина 200 мм, товщина 10 мм (рис. 2.2). Одна зі стінок моделі була знімною; на ній монтувалися різні за розмірами виступи та поглиблення. В експериментах змінювали висоту виступів, ширину та відстань між ними; моделі розташовували горизонтально і вертикально. В якості моделюючої рідини використовували воду. Ступінь турбулізації потоку оцінювали візуально за рухом індикатора (водний розчин чорнила). Подача індикатора проводилася після встановлення режиму перебігу, який визначався за критерієм $Re_{\deltaж}$. Швидкість потоку задавали величиною напору та вузьким перерізом літникової системи (діаметр отвору в чаші). Результати експериментів фіксувалися (табл. 2.1). Ламінарним вважали потік, в якому цівка індикатора коливається, але не розмивається.

Таблиця 2.1 Вплив швидкості потоку на утворення дефектів

Швидкість потоку (м/с)	Тип дефектів	Частка дефектів (%)	Рекомендації
≥ 3.0	Газові пори, неспаї	15	Знизити швидкість потоку
2.0–2.5	Мінімальні неспаї	8	Балансувати тиск
≤ 1.8	Відсутні	0	Рівномірне заповнення

На початку досліджень визначали критичне значення критерію Рейнольдса:

$$Re_{\deltaж} = \frac{\omega_{кр} \cdot \delta / 2}{\nu}, \quad (2.1)$$

де $\omega_{кр}$ – критична швидкість потоку, ν – кінематична в'язкість води, δ - товщина каналу.

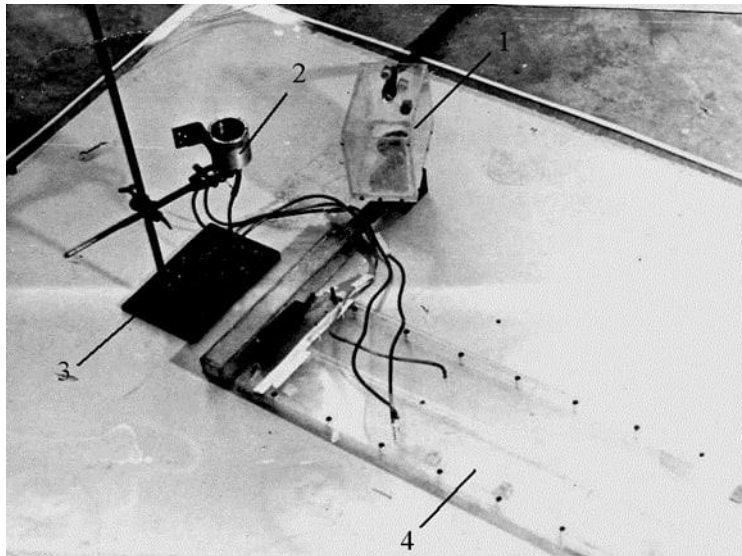


Рисунок 2.2 Експериментальне встановлення для моделі типу «плита»

1 – чаша з регульованим напором, 2 – ємність з індикатором, 3 – хімічний штатив, 4 – прозора модель порожнини форми типу «плита»

Дослідження руху рідини у поглибленнях проводили на установці, представлений на рис. 2.3 (ширина поглиблення 200 мм, товщина $l_y = 20$ мм, глибина $h_y = 7 \div 100$ мм). Значення $Re_{кр}$ змінювали від 325 до 900. В результаті аналізу експериментальних даних було встановлено, що в поглибленнях при $h_y/l_y \approx 1$ утворюється замкнений вихор. У разі збільшення Re процес прискорюється, але схема освіти вихору не змінюється. У поглибленнях з $h_y/l_y > 1$ при ламінарному русі ($Re_{сж} \approx 600$) потік спочатку просувається до задньої стінки і утворює там вихор, а потім другий вихор біля входу в поглиблення. При $Re_{сж} > 700$ початковий етап руху потоку проходить так само, як у поглибленнях з $h_y/l_y \approx 1$, а потім потік утворює другий вихор біля задньої стінки поглиблення. Швидкість перебігу описаних явищ значно менша за швидкість руху основного потоку.

Рідина з поглиблення надходить до основного потоку малими порціями, пульсаціями, область за поглибленням прозора (потік індикатора практично не перемішується), що свідчить про те, що наявність поглиблення не порушує основний потік. Таким чином, основними причинами турбулізації потоку є виступи в порожнину форми, причому два розташовані поруч виступи можна розглядати як один. У зонах зворотного вихору, очевидно, накопичується піна, що підтверджено в роботах. Величина заглиблень у порожнині форми мало змінює основний потік і призводить до його значної турбулізації.

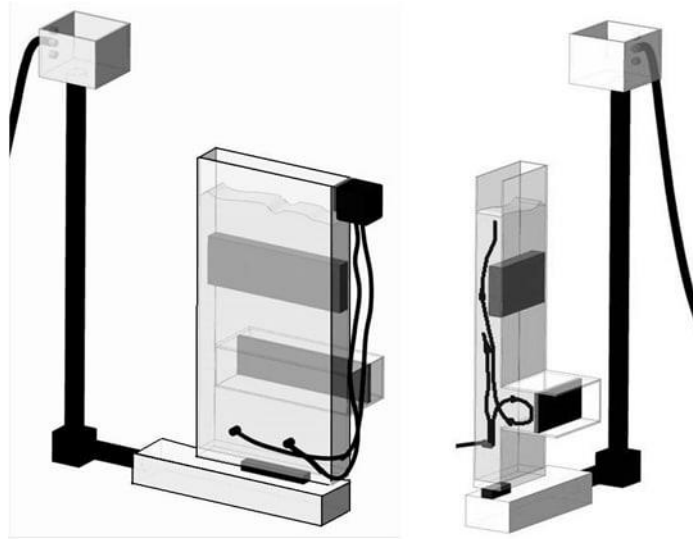


Рисунок 2.3 Експериментальна установка для дослідження поведінки потоку при вертикальному розташуванні плити із змінною глибиною та висотою ребра

Для перевірки отриманих результатів проведено серію експериментальних досліджень за методикою Н. М. Галдіна. Для виключення впливу зовнішніх умов на ступінь відносної забрудненості виливки в контрольній пробі встановлювали поздовжню перегородку (рис. 2.4).

Дослідження проводили на сплаві АК12, температура заливання становила 720 °С, швидкість у порожнині форми – 0,083 м/с і вище, що відповідає початку турбулізації потоку в порожнині простої форми ($Re_{ож} > 2600$). Аналіз контрольних проб на забрудненість і результати рентгенодефектоскопії показують, що за кількістю шлакових включень зразки з ребрами і без них не відрізняються. Це свідчить про можливість застосування більш високих швидкостей заливання форм із заглибленнями та поворотами.

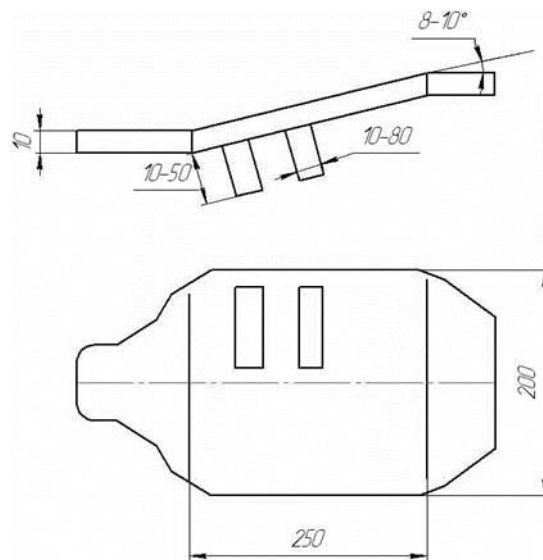


Рисунок 2.4 Схема контрольної проби на забрудненість

Результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок, що

«гідравлічна складність» робочої порожнини форми фасонної виливки при заповненні її алюмінієвим сплавом визначається наступними параметрами (рис. 6): δ_0 – товщина каналу; h_b – висота виступу; l_y – ширина заглиблення; h_y – висота поглиблення

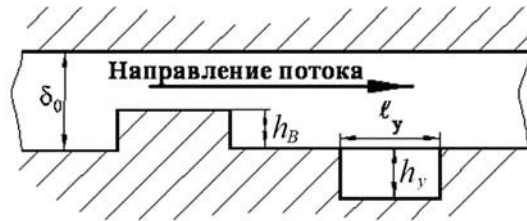


Рисунок 2.5 Схема зміни параметрів порожнини ливарної форми щодо оцінки її «гідравлічної складності»

З цих параметрів отримуємо три критерії параметричного типу (симплекси), що описують «гідравлічну складність» порожнини форми: $K_b = h_b/\delta$; $K_{y1} = h_y/\delta$; $K_{y2} = h_y/l_y$. Експериментальні дані дозволили отримати численні значення цих критеріїв для різних порожнин ливарних форм.

- Якщо: 1. $K_b = 0$; $K_{y1} \leq 0,2$; $K_{y2} \approx 0$ - порожнина форми простої конфігурації;
 2. $K_b \leq 2$; $K_{y1} \leq 6,0$; $K_{y2} \leq 1,0$ – порожнина форми середньої складності;
 3. $K_b > 0,2$; $K_{y1} > 6,0$; $K_{y2} > 1,0$ - порожнина форми складної конфігурації.

Класифікація дозволила значно спростити вибір максимально допустимих швидкостей заповнення за рахунок більш точного вибору «гідравлічної складності» порожнини форми, а отже і критерію шлакоутворення $K_{ш}$, за яким можна вибрати максимально допустиму швидкість заповнення порожнини ливарної форми за тієї чи іншої застосовуваної літникової системи (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 Критичні значення критерію шлакоутворення для тонкостінних виливків з алюмінієвих сплавів

Ділянка форми	Літникова система	$K_{ш}$
Стояк	-	$350 \cdot 10$
Літниковий хід	-	$75 \cdot 10^6$
Живильники	-	$1,2 \cdot 10^6$

Порожнина простої конфігурації	Вертикально-щільнна	$150 \cdot 10^3$
	Сифонна	$75 \cdot 10^3$
	Бічна	$45 \cdot 10^3$
Порожнина конфігурацін середньої складності	Вертикально-щільнна	$18,5 \cdot 10^3$
	Сифонна	$9,0 \cdot 10^3$
	Бічна	$5,5 \cdot 10^3$
Порожнина складної конфігурації	Вертикально-щільнна	$6,5 \cdot 10^3$
	Сифонна	$3,1 \cdot 10^3$
	Бічна	$1,8 \cdot 10^3$

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ ЛІТНИКОВИХ СИСТЕМ ПРИ ЛИТТІ ЛЕГКИХ СПЛАВІВ

3.1. Методика проектування та розрахунку виконуваних розмірів нижньої та ярусної литникової системи

- 1) Вибираємо положення виливки у формі.
- 2) Вибираємо всі необхідні фізико-технологічні параметри металу та форми.
- 3) За кресленням виливки розбиваємо її на графи (приклади поділу виливки на графи наведені у додатку), знаючи, що:
 - а) вузол - це точка у виливку, де потік розплаву змінює напрямок або свою швидкість (стрибкоподібно);
 - б) ділянка або елемент порожнини форми – це відстань між найближчими вузлами, що заповнюються послідовно.

Будуємо орієнтований граф.

- 4) Визначення "гідравлічної складності" порожнини форми.
- 5) Розраховуємо критичну швидкість заповнення порожнини форми:

$$K_{ш} = \frac{Re_{кр} \cdot We_{кр}}{h_{п}} \Rightarrow \omega_{кр} = \sqrt[3]{\frac{K_{ш} \cdot \sigma \cdot v \cdot h_{п}}{\rho \cdot l_0^3}} \quad (3.1)$$

- 6) Визначаємо швидкість потоку розплаву у вузькому місці литникової системи:

$$F_{уз, \max} = \frac{\omega_{кр} \cdot F_{\phi}}{\omega_{уз, \max}} = \frac{\omega_{кр} \cdot F_{\phi}}{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad (3.2)$$

- 7) Визначаємо середню швидкість заповнення ділянки $i-(i+1)$, використовуючи рівняння суцільності:

$$\frac{\omega_{i-(i+1)}}{\omega_{уз, i-(i+1)}} = \frac{F_{уз, м.}}{F_{i-(i+1)}}; \omega_{i-(i+1)} = \frac{F_{уз, м.} \cdot \omega_{уз, м. (i-(i+1))}}{F_{i-(i+1)}} = \frac{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot q \cdot \left(H - \frac{h_{i-(i+1)}}{2} \right)} \cdot F_{уз, м.}}{F_{i-(i+1)}} \quad (3.3)$$

- 8) Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі, α Вт/(м²·К):

$$\text{ПГФ: } Re_{\delta_{ж}} < 50 \quad Nu_{\delta_{ж}} = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot l_0$$

$$Re_{\delta_{ж}} \geq 50 \quad Nu_{\delta_{ж}} = 0,033 \cdot Re_{\delta_{ж}}^{0,82} \quad (3.4)$$

$$\text{МФ: } Re_{\delta_{ж}} \leq 80 \quad Nu_{\delta_{ж}} = \frac{1}{K_{п}} \cdot 0,033 \cdot (Re_{\delta_{ж}})^{0,6}$$

$$\text{ЛВМ: } Nu_{\delta_{ж}} = 0,173 \cdot Re_{\delta_{ж}}^{0,23}, \quad Re_{\delta_{ж}} \leq 10$$

- 9) Оцінюємо падіння температури на ділянці $i-(i+1)$ за методикою

[112] :

$$T = \left[(T_{\text{зал}} - T_{\text{фн}}) \cdot \exp \left(- \frac{y_1 \alpha \sqrt{\lambda_{\text{п}}}}{c \cdot \rho \cdot l_0 \omega \sqrt{\lambda_{\text{ф}} \left(1 + \frac{b_{\text{ф}}}{b_{\text{п}}} \right)}} \right) \right] + T_{\text{фн}} \quad (3.5)$$

10) $T_{i-(i+1)} > T_{\text{ост. потоку}}$

11) Повторюємо розрахунок наступних ділянок

12) Якщо $T_i < T_{\text{ост. потоку}}$ після заповнення виливки, то робимо інше підведення металу чи змінюємо тип литникової системи

13) Якщо $T_i > T_{\text{ост. потоку}}$ в кінці заповнення, то знижуємо температуру заповнення

14) Якщо $T_i \approx T_{\text{ост. потоку}}$, то розраховуємо за співвідношенням розміри литникової системи та визначаємо її конфігурацію залежно від конфігурації порожнини форми.

15) Проводимо повний розрахунок заповнюваності порожнини форми з коефіцієнтом μ , розрахованим для кожної ділянки.

16) Якщо $T_i = T_{\text{ост. потоку}}$, то вибрано оптимальний варіант літникової системи.

17) Використовуючи отримані розрахункові дані розмірів литникової системи, що виконуються, проводимо математичне моделювання заповнення та затвердіння за допомогою пакета прикладних програм LVM FLOW–3D.

18) За отриманими розмірами усадочних дефектів вибираємо розміри прибутків або холодильників та проводимо моделювання заповнення та затвердіння повторно.

3.2. Методика проектування та розрахунку виконуваних розмірів вертикально-щілинної литникової системи

1) Визначаємо наведену товщину порожнини форми:

$$R_0 = \frac{1}{2} \cdot \delta_{\text{отр}}, \quad (3.6)$$

2) Визначаємо гранично допустиму швидкість заповнення, що забезпечує відсутність вторинного шлакоутворення:

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{K_{\text{м}} \cdot v \cdot h_{\text{пл}} \cdot \sigma}{R_0^3 \cdot \rho_{\text{ж}}}}, \quad (3.7)$$

3) Визначаємо допустиму витрату металу:

$$Q = L \cdot \omega \cdot \delta_{\text{отл}}, \quad (3.8)$$

4) Визначаємо кут розтікання металу, виходячи з максимально можливої витрати:

$$\varphi = 0,4 \cdot Q^{0,195} \cdot \delta_{\text{щ}}^{-1,09} \quad (3.9)$$

$$\delta_{\text{щ}} = 0,7 \cdot \delta_{\text{отл}} \quad (3.10)$$

5) Визначаємо швидкість поперечного розтікання, м/с:

$$v_p = \sqrt[3]{S^2 \cdot \frac{Q}{2R_0} \cdot \sin \varphi} \quad (3.11)$$

6) Визначаємо висоту потоку розплаву при допустимій витраті, м:

$$h_p = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{S \cdot 2R_0}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sin \varphi}} \quad (3.12)$$

7) Визначаємо наведений розмір потоку розплаву, що розтікається:

$$l_0 = \frac{2h_p \cdot 2R_0}{2h_p + 2R_0} \quad (3.13)$$

8) Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі при проточно-поперечному розтіканні, α Вт/(м²·К):

$$\text{ПГФ: } \text{Re}_{\delta_{\text{ж}}} < 25 \quad \text{Nu}_{\delta_{\text{ж}}} = 0,0297 \cdot \text{Re}_{\delta_{\text{ж}}}^{0,403}$$

$$\text{МФ: } \text{Re}_{\delta_{\text{ж}}} \leq 25 \quad \text{Nu}_{\delta_{\text{ж}}} = \frac{1}{\text{Кп}} \cdot 0,00597 \cdot \text{Re}_{\delta_{\text{ж}}}^{1,52} \quad (3.14)$$

$$\text{ЛВМ: } \text{Re}_{\delta_{\text{ж}}} \geq 10 \quad \text{Nu}_{\delta_{\text{ж}}} = 0,0086 \cdot \text{Re}_{\delta_{\text{ж}}}^{1,247}$$

9) Визначаємо максимальну довжину розтікання розплаву, м:

$$L_{p\text{max}} = \frac{\ln \frac{T_{\text{зал}} - T_{\text{фн}}}{T_0 - T_{\text{фн}}} \cdot c_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot l_0 \cdot v_p \cdot \left(1 + \frac{b_M}{b_\phi}\right)}{\alpha} \quad (3.15)$$

10) Визначаємо можливість застосування одного колодязя, порівнюючи довжину розтікання розрахункову з довжиною порожнини форми, в якій відбувається розтікання:

$$L_p \geq 1,2 \cdot L \quad (3.16)$$

11) Визначаємо конфігурацію литникової системи, розраховуємо коефіцієнт витрати і площу і розмір стояка, м²:

$$F_{\text{ст}} = \frac{Q}{\mu \cdot \sqrt{2g \cdot H_{\text{ст}}}} \quad (3.17)$$

$$R_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{F_{\text{ст}}}{\pi}} \quad (3.18)$$

$$12) \text{ Визначаємо діаметр колодязя, м: } d_k = 4 \cdot \delta_{\text{щ}} \quad (3.19)$$

13) Використовуючи отримані розрахункові дані розмірів литникової системи, що виконуються, проводимо математичне моделювання заповнення та затвердіння за допомогою пакета прикладних програм LVM FLOW–3D.

14) За отриманими розмірами усадочних дефектів вибираємо розміри прибутків або холодильників і виконуємо математичне моделювання заповнення та затвердіння повторно.

Схема алгоритму розрахунку розмірів литникової системи, що виконуються, представлена на рис. 3.1.

3.3. Розрахунок ярусної системи виливки «Корпус»

Розрахунок заповнюваності проведемо за постійного коефіцієнта витрати μ для виливки "Корпус" (рис. 3.2).

Вибираємо всі необхідні фізико-технологічні параметри металу та форми та розбиваємо порожнину форми на окремі вузли та елементи щодо спрямування руху металу.

$$T_{\text{зал}} = 1033 \text{ К}$$

$$\rho_{\phi} = 1600 \text{ кг/м}^3$$

$$T_{\text{лик}} = 864 \text{ К}$$

$$\lambda_{\phi} = 0,515 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$T_{\text{сол}} = 850 \text{ К}$$

$$b_{\text{м}} = 15975 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$$

$$c_{\text{м}} = 1286 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$b_{\phi} = 950 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$$

$$\rho_{\text{м}} = 2390 \text{ кг/м}^3$$

$$v = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\lambda_{\text{м}} = 83 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$h_{\text{п}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$c_{\phi} = 1100 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

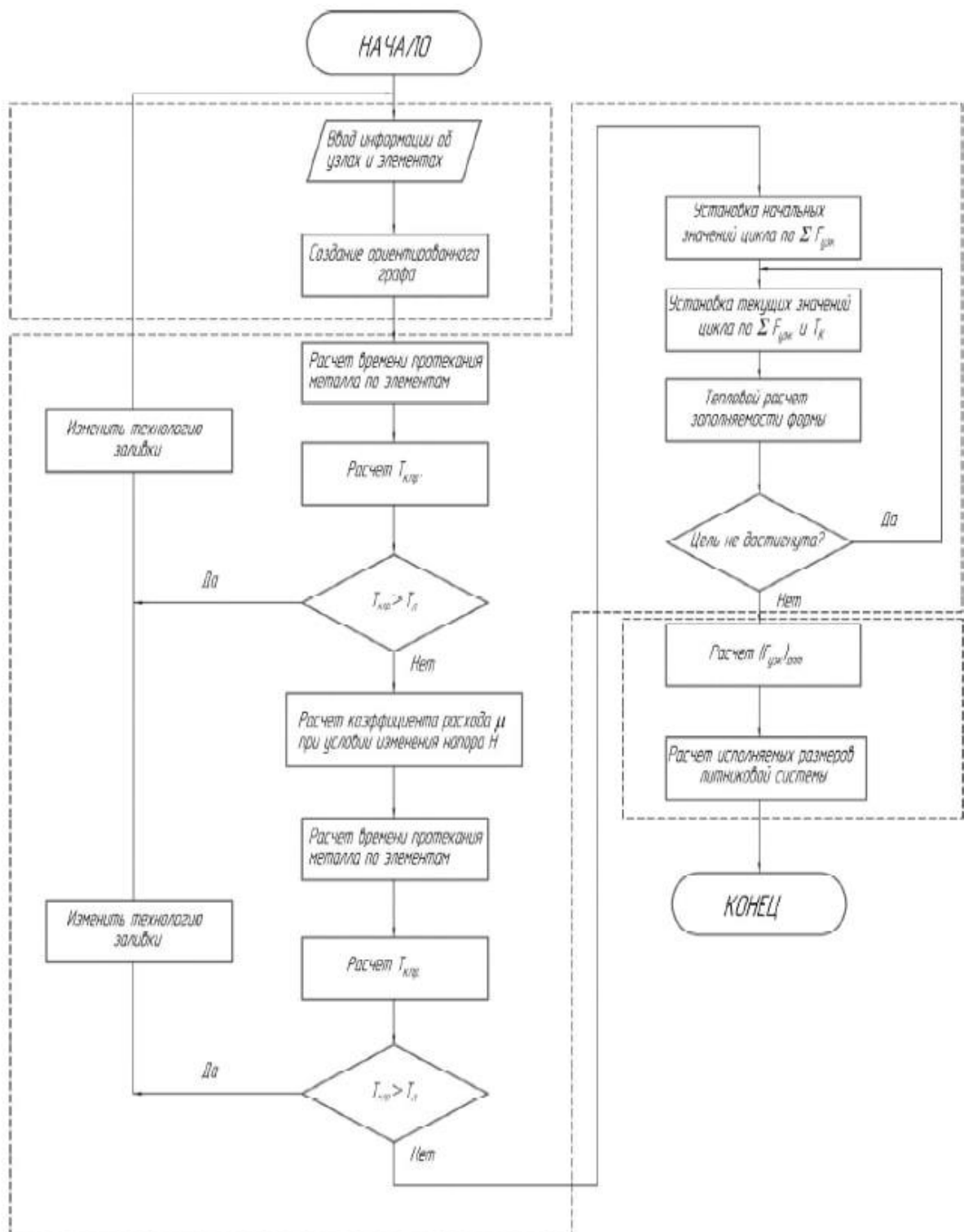


Рисунок 3.12 Схема алгоритму розрахунку виконуваних розмірів литникової системи

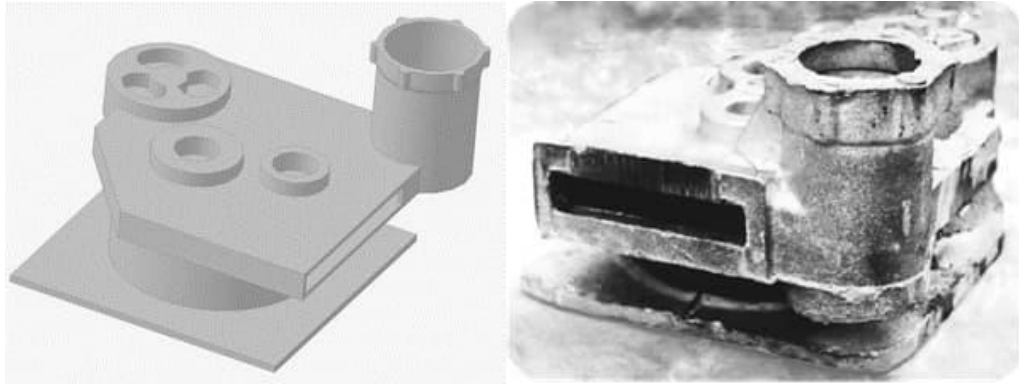


Рисунок 3.2 ЗВиливка "Корпус", сплав АК12, маса 12,28 кг

Будуємо орієнтований граф з наступними геометричними параметрами:

$$\begin{array}{llll}
 h_1 = 0 \text{ м} & F_{1-2} = 7,42 \times 10^{-3} \text{ м}^2 & y_{1-2} = 0,092 \text{ м} & l_{01-2} = 0,0035 \text{ м} \\
 h_2 = 0,092 \text{ м} & F_{2-3} = 2,45 \times 10^{-3} \text{ м}^2 & y_{2-3} = 0,16 \text{ м} & l_{02-3} = 0,0035 \text{ м} \\
 h_3 = 0,092 \text{ м} & F_{3-4} = 8,68 \times 10^{-3} \text{ м}^2 & y_{3-4} = 0,071 \text{ м} & l_{03-4} = 0,0035 \text{ м} \\
 h_4 = 0,163 \text{ м} & F_{4-5} = 2,24 \times 10^{-3} \text{ м}^2 & y_{4-5} = 0,165 \text{ м} & l_{04-5} = 0,0035 \text{ м} \\
 h_5 = 0,163 \text{ м} & F_{5-6} = 2,64 \times 10^{-3} \text{ м}^2 & y_{5-6} = 0,075 \text{ м} & l_0^{5-6} = 0,0035 \text{ м}
 \end{array}$$

де h – рівень вузла, м; F – площа поперечного перерізу ділянки, м²;

y - Довжина ділянки, м; l_0 – наведений розмір ділянки м.м.

Розбиваємо порожнину форми окремі вузли (рис. 3.3).

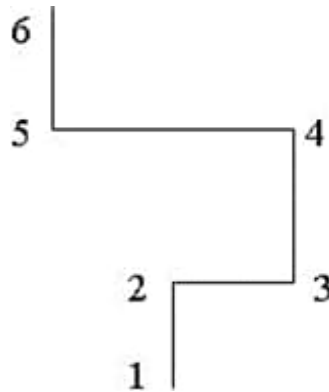


Рисунок 3.34 Орієнтований граф виливка «Корпус»

Аналіз геометричних особливостей виливки дозволяє зробити висновок про те, що воно відноситься за гідравлічною складністю порожнини форми до виливків простої складності.

Визначаємо критичну швидкість заповнення порожнини форми за формулою (3.7):

$$\omega_{кр} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,86 \cdot 6 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{2390 \cdot 0,0035^3}} = 0,061 \text{ м/с}$$

Цю швидкість має потік у нижній частині вилівка при максимальному натиску. Визначаємо максимальну площу вузького перерізу $F_{уз}$ тах літникової системи. Для легких сплавів цим місцем є нижній переріз стояка за формулою (3.2):

$$F_{уз.max} = \frac{0,061 \cdot 7,42 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,81 \cdot 0,4} = 2,693 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Визначаємо середню швидкість заповнення на ділянці 1-2 м/с за формулою:

$$\omega_{1-2} = \frac{0,6 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (0,4 - 0,092/2)} \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{7,42 \cdot 10^{-3}} = 0,057 \text{ м/с}$$

Фарба у формі відсутня, тому $\frac{\lambda_{п}}{\lambda_{ф}} = 1$. Визначимо коефіцієнт тепловіддачі α за формулами:

$$Re_{\delta ж} = \frac{0,057 \cdot 0,0035}{6 \cdot 10^{-7}} = 335 < 3000 \Rightarrow Nu_{\delta ж} = 1$$

$$\alpha = \frac{1 \cdot 83}{0,0035} = 23714 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 1-2 за формулою:

$$T_{1-2} = (1033 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 1,6}{1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 900 \text{ К}$$

При вході в горизонтальний канал (внутрішня перегородка) відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобміном з коефіцієнтом 1,04. Тому температура ядра потоку на вході у цей момент за формулою:

$$T_{1-2} = 900 \cdot 1,04 = 936 \text{ К}$$

Визначаємо теплові втрати на ділянці (2-3) за формулами:

$$\omega_{уз2-3} = 0,6 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,308} = 1,475 \text{ м/с}$$

$$\omega_{2-3} = \frac{1,475 \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{2,45 \cdot 10^{-3}} = 0,162 \text{ м/с}$$

Оскільки заповнення відбувається з чотирьох сторін, то середній час руху одного потоку дорівнює $1/4 t_{\Sigma}$, тобто загальний час заповнення за формулами:

$$t_{\Sigma} = \frac{0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,007}{2,47 \cdot 10^{-3} \cdot 0,162} = 1,6 \text{ с}$$

$$t_{2-3} = 1,6 \cdot 1/4 = 0,4 \text{ с}$$

Течія у горизонтальних площинах супроводжується масобміном з коефіцієнтом $K_m = 2$. Розраховуємо температуру на ділянці 2-3 за формулою:

$$T_{2-3} = (936 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 0,4}{2 \cdot 1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 920 \text{ К}$$

При повороті наступного каналу відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобміном з коефіцієнтом 1,04 розраховуємо температуру на ділянці 2-3 за формулою:

$$T_{2-3} = 920 \cdot 1,04 = 956 \text{ К}$$

На наступній ділянці (3-4) відбувається підйом металу у вертикальній порожнині форми, визначаємо ω_{3-5} та втрати температури на ділянці (3-5) за формулами:

$$\omega_{y_{3-4}} = 0,6\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,264} = 1,367 \text{ м/с}$$

$$\omega_{3-4} = \frac{1,367 \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{8,68 \cdot 10^{-3}} = 0,0424 \text{ м/с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 3-5 за формулами:

$$T_{3-4} = (956 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 1,67}{1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 830 \text{ К}$$

$$T_{3-4} < T_a$$

Звідси випливає, що на ділянці можливий дефект «спай», зупинка потоку і що сифонна система при такому підведенні не забезпечить якісного заповнення порожнини ливарної форми, потрібна ярусна литникова система з збільшенням площі перетину стояка. Підведення ярусу зручне в кінці ділянки (1 – 2), по роз'єму форми.

Визначаємо теплові втрати на ділянці (3–4) при ярусній литниковій системі за формулами:

$$\omega_{y_{3-4}} = 0,6\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2645} = 1,367 \text{ м/с}$$

$$\omega_{3-4} = \frac{1,367 \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{8,68 \cdot 10^{-3}} = 0,0424 \text{ м/с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 3–5 за формулою:

$$T_{3-4} = (1033 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 1,67}{1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 894 \text{ К}$$

При повороті наступного каналу відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобміном з коефіцієнтом 1,04 за формулою:

$$T_{3-4} = 894 \cdot 1,04 = 930 \text{ К}$$

Ділянка (4–5) горизонтальна, з $K_m = 2$, заповнення елемента йде з чотирьох сторін. Визначаємо втрати температури на ділянці (4–5) за формулами:

$$t_\Sigma = \frac{0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,007}{2,24 \cdot 10^{-3} \cdot 0,153} = 1,84 \text{ с}$$

$$t_{4-5} = 1,84 \cdot 1/4 = 0,46 \text{ с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 4–5 за формулою:

$$T_{4-5} = (930 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 0,46}{2 \cdot 1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 912 \text{ К}$$

При повороті наступного каналу відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобменом з коефіцієнтом 1,04 за формулою:

$$T_{4-5} = 912 \cdot 1,04 = 948 \text{ К}$$

Визначаємо втрати температури на вертикальній ділянці (5–6) за формулами :

$$\omega_{y35-6} = 0,6 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,184} = 1,14 \text{ м/с}$$

$$\omega_{5-6} = \frac{1,14 \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{2,64 \cdot 10^{-3}} = 0,116 \text{ м/с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 6–7 за формулою:

$$T_{5-6} = (948 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 0,776}{1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 887 \text{ К}$$

Проводимо даний розрахунок менша або швидкість заповнення, або температуру заливки, доки температура $T_{6-7} \approx T_0$, це буде оптимальна швидкість заповнення. Знаючи площу вузького місця, за рекомендованими співвідношеннями визначимо розміри литникової системи, що виконуються.

Перерахунок заповнюваності виливка «Корпус» при змінному коефіцієнті μ .

Розраховуємо значення коефіцієнта витрати μ за формулами:

$$\mu_{1-2} = \frac{1}{\sqrt{1+1,952}} = 0,58$$

$$\mu_{2-3} = \frac{1}{\sqrt{1+2,76}} = 0,52$$

$$\mu_{3-5} = \frac{1}{\sqrt{1+3,2}} = 0,49$$

$$\mu_{5-6} = \frac{1}{\sqrt{1+3,41}} = 0,48$$

$$\mu_{6-7} = \frac{1}{\sqrt{1+4,14}} = 0,44$$

Визначаємо критичну швидкість заповнення порожнини форми за формулою:

$$\omega_{кр} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,86 \cdot 6 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{2390 \cdot 0,0035^3}} = 0,061 \text{ м/с}$$

Цю швидкість має потік у нижній частині виливка при максимальному натиску. Визначаємо максимальну площу вузького перерізу $F_{уз.мах}$ литникової системи. Для легких сплавів цим місцем є нижній переріз стояка за формулою:

$$F_{y3.\max} = \frac{0,061 \cdot 7,42 \cdot 10^{-3}}{0,58 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,81 \cdot 0,4} = 2,786 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Визначаємо середню швидкість заповнення на ділянці 1–2 м/с за формулою:

$$\omega_{1-2} = \frac{0,58 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (0,4 - 0,092/2)} \cdot 2,786 \cdot 10^{-4}}{7,42 \cdot 10^{-3}} = 0,0574 \text{ м/с}$$

Фарба у формі відсутня, тому $\frac{\lambda_n}{\lambda_\phi} = 1$. Визначимо коефіцієнт тепловіддачі α за формулами:

$$Re_{\deltaж} = \frac{0,0574 \cdot 0,0035}{6 \cdot 10^{-7}} = 335 < 3000 \Rightarrow Nu_{\deltaж} = 1$$

$$\alpha = \frac{1,83}{0,0035} = 23714 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 1–2 за формулою:

$$T_{1-2} = (1033 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 1,6}{1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 900 \text{ К}$$

При вході в горизонтальний канал (внутрішня перегородка) відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобміном з коефіцієнтом 1,04. Тому температура ядра потоку на вході у цей момент, за формулою:

$$T_{1-2} = 900 \cdot 1,04 = 936 \text{ К}$$

Визначаємо теплові втрати на ділянці (2-3) за формулами:

$$\omega_{y32-3} = 0,52 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,308} = 1,278 \text{ м/с}$$

$$\omega_{2-3} = \frac{1,278 \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{2,45 \cdot 10^{-3}} = 0,123 \text{ м/с}$$

Оскільки заповнення відбувається з чотирьох сторін, то середній час руху одного потоку дорівнює $1/4 t_\Sigma$, тобто загальний час заповнення, за формулами:

$$t_\Sigma = \frac{0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,007}{2,45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,162} = 1,8 \text{ с}$$

$$t_{2-3} = 1,8 \cdot 1/4 = 0,45 \text{ с}$$

Течія у горизонтальних площинах супроводжується масобміном з коефіцієнтом $K_m = 2$. Розраховуємо температуру на ділянці 2–3 за формулою:

$$T_{2-3} = (936 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 0,45}{2 \cdot 1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 918 \text{ К}$$

При повороті наступного каналу відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобміном з коефіцієнтом 1,04 за формулою:

$$T_{2-3} = 918 \cdot 1,04 = 955 \text{ К}$$

На наступній ділянці (3–4) відбувається підйом металу у вертикальній порожнині форми, визначаємо ω_{3-5} та втрати температури на ділянці (3–4) за формулами:

$$\omega_{y3-4} = 0,49\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,264} = 1,12 \text{ м/с}$$

$$\omega_{3-4} = \frac{1,12 \cdot 2,789 \cdot 10^{-4}}{8,68 \cdot 10^{-3}} = 0,0359 \text{ м/с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 3–4 за формулами:

$$T_{3-4} = (955 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 1,98}{1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 811 \text{ К}$$

$$T_{3-4} < T_{л}$$

Звідси випливає, що на ділянці можливий дефект «спай», зупинка потоку і що сифонна система при такому підведенні не забезпечить якісного заповнення порожнини ливарної форми, потрібна ярусна литникова система з збільшенням площі перетину стояка. Підведення ярусу зручне в кінці ділянки (1 – 2), по роз'єму форми.

Визначаємо теплові втрати на ділянці (3–4) при ярусній литниковій системі, за формулами:

$$\omega_{y3-4} = 0,49\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2645} = 1,12 \text{ м/с}$$

$$\omega_{3-4} = \frac{1,12 \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{8,68 \cdot 10^{-3}} = 0,0359 \text{ м/с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 3-4 за формулою:

$$T_{3-4} = (1033 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 1,98}{1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 872 \text{ К}$$

При повороті наступного каналу відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобменом з коефіцієнтом 1,04 за формулою:

$$T_{3-4} = 872 \cdot 1,04 = 908 \text{ К}$$

Ділянка (4–5) горизонтальна, з $K_m = 2$, заповнення елемента йде з чотирьох сторін, за формулами:

$$t_{\Sigma} = \frac{0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,007}{2,24 \cdot 10^{-3} \cdot 0,108} = 2,6 \text{ с}$$

$$t_{4-5} = 2,6 \cdot 1/4 = 0,65 \text{ с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 5–6 за формулою:

$$T_{4-5} = (908 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 0,65}{2 \cdot 1286 \cdot 2390 \cdot 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 884 \text{ К}$$

При повороті наступного каналу відбувається поворот потоку на 90° , що супроводжується масобменом з коефіцієнтом 1,04 за формулою:

$$T_{4-5} = 884 \cdot 1,065 = 941 \text{ K}$$

Визначаємо втрати температури на вертикальній ділянці (6–7) за формулами:

$$\omega_{y_{35-6}} = 0,44\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,184} = 0,84 \text{ м/с}$$

$$\omega_{5-6} = \frac{0,84 \cdot 2,693 \cdot 10^{-4}}{2,64 \cdot 10^{-3}} = 0,088 \text{ м/с}$$

Розраховуємо температуру на ділянці 6–7 за формулою:

$$T_{5-6} = (941 - 293) \exp \left[\frac{-23714 \cdot 1,02}{1286 \cdot 2390 - 0,0035 \cdot \left(1 + \frac{15975}{950}\right) \cdot \sqrt{1}} \right] + 293 = 864 \text{ K}$$

$$T_{5-6} = T_{\text{л}}$$

Для порівняння отриманих було проведено моделювання процесу заповнення виливка «Корпус» за допомогою програмного комплексу «LVM Flow 3D».

За допомогою програми «КОМПАС 3D» було створено модель виливка «Корпус» з литниково-живильною системою (рис. 3.4).

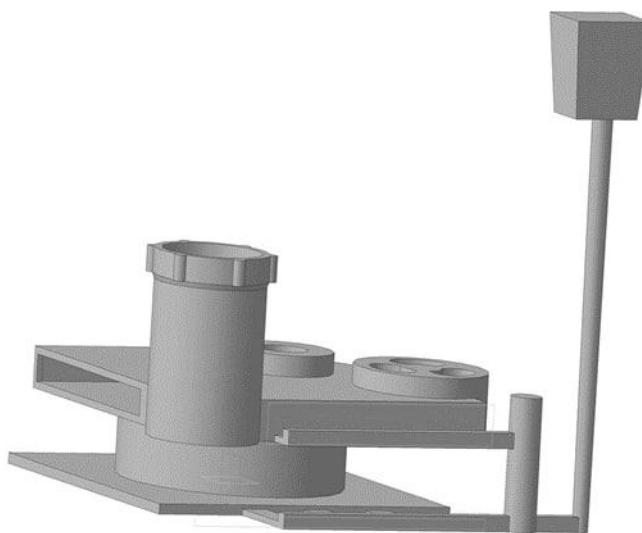
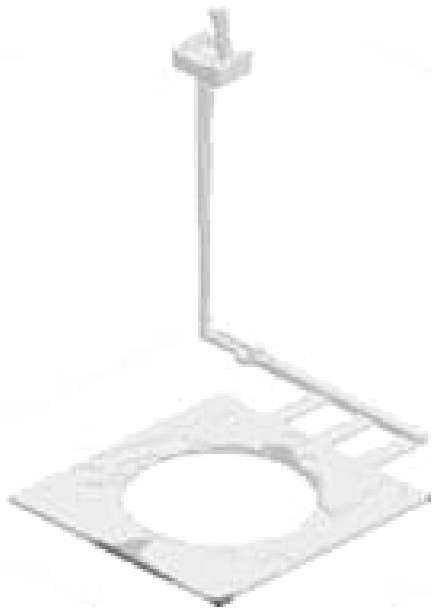


Рисунок 3.45 Модель виливка з литниково-живильною системою

Етапи заповнення виливка представлені на рис. 3.5.

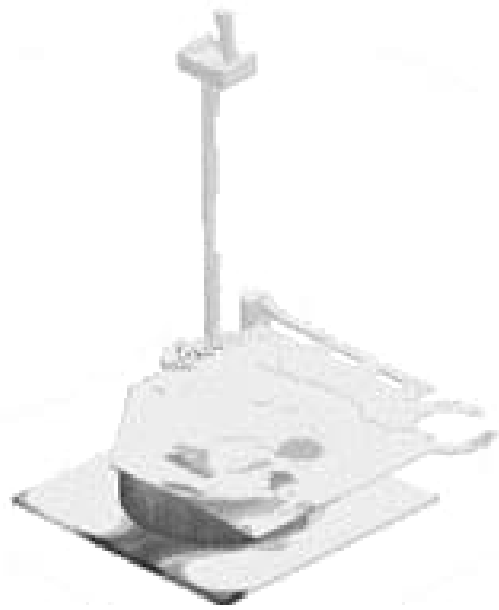


а)

Час заповнення: 04,960 с

Заповнено: 20,00 %

Рідка фаза: 99,69 %



б)

Час заповнення: 09,918 с

Заповнено: 40,00 %

Рідка фаза: 96,82 %



в)

Час заповнення: 17,357 с

Заповнено: 70,00 %

Рідка фаза: 91,55 %



г)

Час заповнення: 21,077 с

Заповнено: 85,00 %

Рідка фаза: 89,41 %

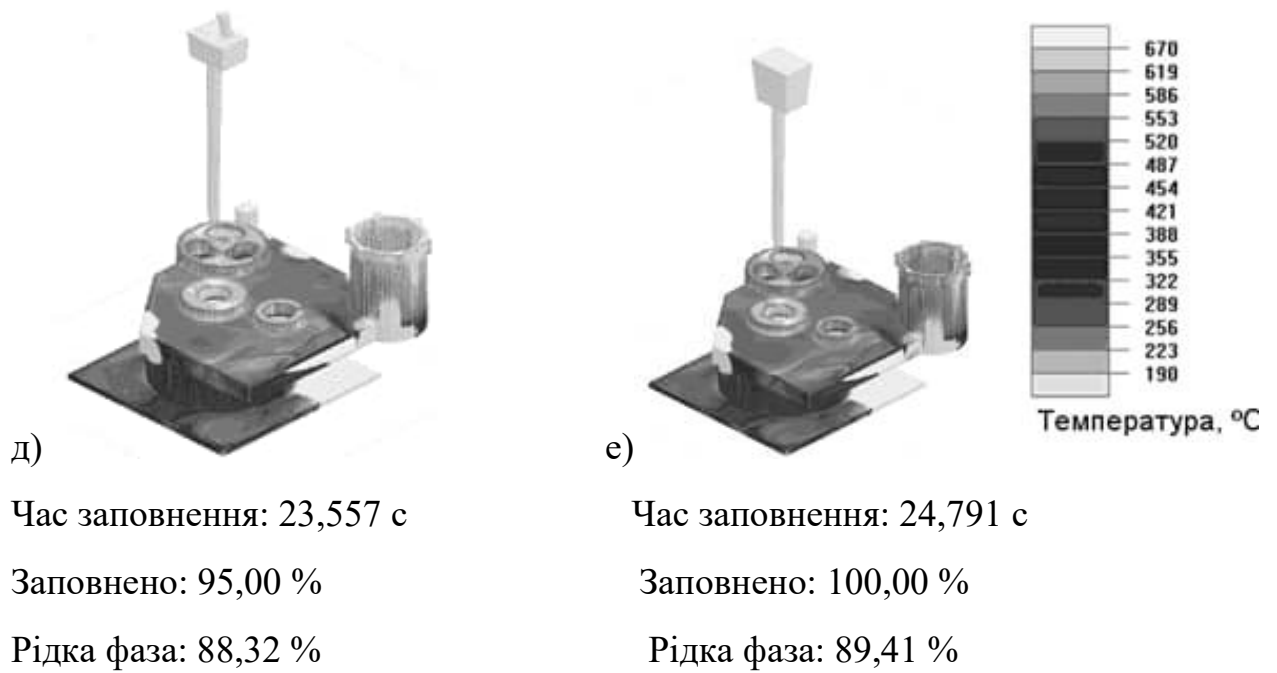


Рисунок 3.56 Етапи заповнення форми:

а), б), в), г), д), е) – різний відсоток заповнення форми

Усадочні дефекти, виявлені після закінчення затвердіння виливка, представлені на рис. 3.6.

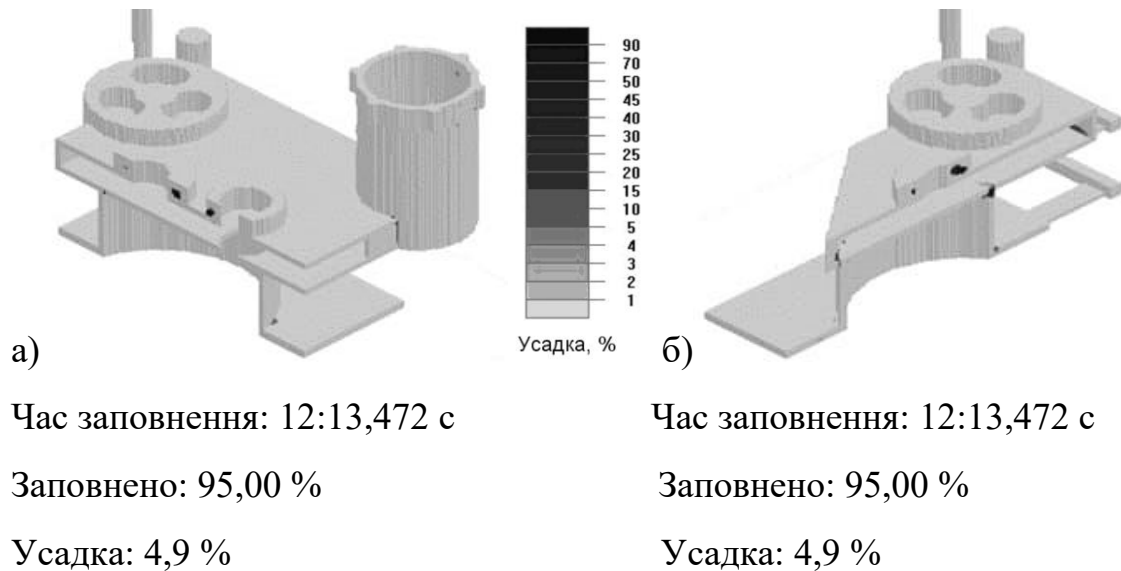


Рисунок 3.67 Усадкові дефекти: а), б) – різні перерізи виливки

Виходячи з розмірів усадкових дефектів, вибираємо розмір прибутків, холодильників і робимо розрахунок заново.

3.4. Розрахунок ярусної литникової системи для виливки

«Корпус»

1) Необхідні для розрахунку фізико-технологічні параметри металу та форми

$$T_{\text{зал}} = 1073 \text{ К}; \quad \lambda = 83 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \quad b_{\phi} = 975,14 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$T_{\text{н.ф.}} = 473 \text{ К}; \quad \rho = 2200 \text{ кг/м}^3; \quad b_{\text{м}} = 15323,96 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$T_{\text{л}} = 870 \text{ К}; \quad c = 1286 \text{ К/кг} \cdot \text{К}; \quad \delta = 0,0025 \text{ м};$$

$$H = 0,17 \text{ м}; \quad \nu = 6 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu = 0,4;$$

2) Розбиваємо виливок на окремі вузли (рис. 3.7):

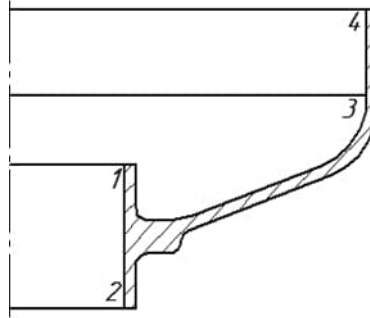


Рисунок 3.78 Розбивка виливки на вузли

3) Визначаємо швидкість:

Дана виливок відноситься до конфігурації середньої складності виходячи, з цього приймаємо, Re 470.

Знаходимо наведений розмір (l_0) за формулами:

$$l_0 = \frac{\delta}{2} = \frac{0,0025}{2} = 0,00125 \text{ м}$$

$$\omega = \frac{470 \cdot 6 \cdot 10^{-7}}{0,00125} = 0,23 \text{ м/с}$$

4) Визначаємо $F_{\text{уз.м.}}$ за формулами:

$$\omega_{\text{уз}(1-2)} = \mu \sqrt{2gH} = 0,4 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,17} = 0,73 \text{ м/с}$$

$$F_{\text{уз.м.}} = \frac{\omega_{\text{шл}} \cdot F_{1-2}}{\omega_{\text{уз.м.}}(1-2)} = \frac{0,023 \cdot 3,14 \cdot 0,198 \cdot 0,0025}{0,73} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

5) Визначаємо середню швидкість заповнення на ділянці (1-2) по формулі:

$$\omega_{1-2} = \frac{F_{\text{уз.м.}} \cdot \omega_{\text{уз.м.}}}{F_{1-2}} = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,73}{1,6 \cdot 10^{-3}} = 0,23 \text{ м/с}$$

6) Коефіцієнт температуропровідності розрахуємо за формулою:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

– Визначаємо критерій Пекле за формулами:

$$Re_{\text{дж}} = \frac{\omega \cdot l_0}{\alpha} = \frac{0,23 \cdot 0,00125}{2,9 \cdot 10^{-5}} = 9,91;$$

$$a = \frac{83}{1286 \cdot 2200} = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с},$$

– Визначаємо критерій Нуссельта за формулою:

$$\text{Nu}_{\delta_{\text{ж}}} = 0,173 \cdot \text{Re}_{\delta_{\text{ж}}}^{0,23} = 0,173 \cdot 9,91^{0,23} = 0,29$$

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі, за формулою:

$$\alpha = \frac{0,29 \cdot 83}{0,00125} = 19256 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

7) Оцінюємо втрати температур на ділянці (1–2) за формулою:

$$T_{1-2} = [1073 - 473] \cdot e^{\frac{-0,02981 \cdot 19256}{1286 \cdot 2200 \cdot 0,00125 \cdot 0,23 \cdot \left[1 + \frac{153236}{975,14}\right]}} + 473 = 1050 \text{ К} > T_{\text{л}} = 873 \text{ К}$$

Аналогічний розрахунок проводимо на ділянці 2–3. Розрахунки зводимо у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Результати розрахунку

№ Ділянки	Середня швидкість заповнення ω , м/с	Температура T , К
1 – 2	0,23	1050
2 – 3	0,17	1005

8) За співвідношенням визначаємо розміри литникової системи, за формулою:

$$F_{\text{ст}} : \sum F_{\text{жив}} : \sum F_{\text{с.к}} = 1:3:1 ,$$

– Зі співвідношення площа стояка дорівнює:

$$F_{\text{ст}} = \sum F_{\text{ст}} = F_{\text{уз.м.}}$$

– Визначаємо радіус стояка із формули:

$$F_{\text{ст}} = \sum F_{\text{ст}} = F_{\text{уз.м.}}$$

$$R = \sqrt{\frac{F_{\text{уз.м.}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 13 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 13 \text{ мм}$$

– $\sum F_{\text{жив}}$. - Сумарна площа перерізу всіх живильників визначається:

$$\sum F_{\text{жив}} = 3 \cdot F_{\text{ст}} = 3 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 1500 \text{ мм}^2$$

Для порівняння було проведено моделювання процесу заповнення виливка «Корпус» за допомогою програмного комплексу «LVM Flow 3D».

За допомогою програми «КОМПАС 3D» було створено модель виливка «Корпус» з литниково-живильною системою (рис. 3.8).

Етапи заповнення виливка, а також усадкові дефекти, виявлені після закінчення затвердіння виливки представлені на рис. 3.9.

Виходячи з розмірів усадкових дефектів, вибираємо розмір прибутків, холодильників і робимо розрахунок заново.

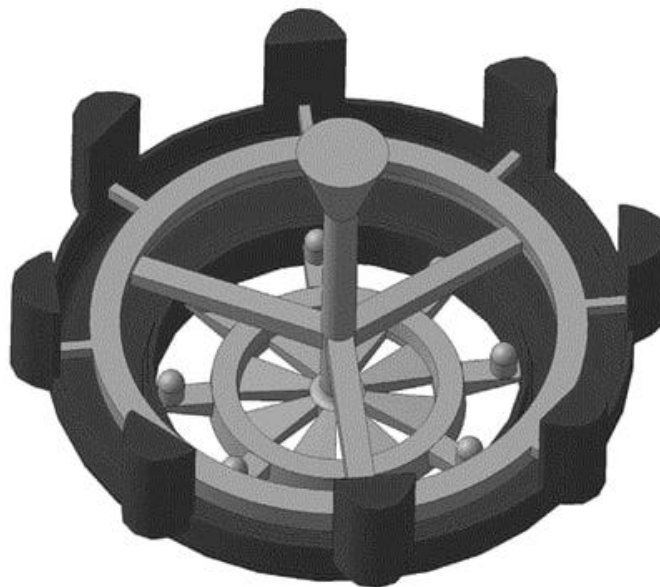


Рисунок 3.89 Модель виливки з літничково-живильною системою



Рисунок 3.910 Результаты процессу моделювання

3.5. Розрахунок вертикально-щілинної литничкової системи для виливки «Корпус»

Виливок «Корпус» виготовляється з алюмінієво-кремнієвого сплаву марки АК7ч. Габаритні розміри виливки становлять 180×462×4,5 мм. У

програмі «КОМПАС 3D» створено моделі вилівки «Корпус» (рис. 3.10) та літничково-живильної системи (рис. 3.11).

Так як вилівок має велику протяжність, то доцільно розташувати її у формі вертикально і застосувати вертикально-щілинну систему підведення металу:

1. Визначимо наведену товщину стінки, за формулою (3.6):

$$R_0 = \frac{1}{2} \cdot 0,004 = 0,002 \text{ м}$$

2. Розраховуємо гранично допустиму швидкість заповнення, за формулою (3.7):

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{18,5 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,86}{0,002^3 \cdot 2200}} = 0,14 \text{ м/с}$$

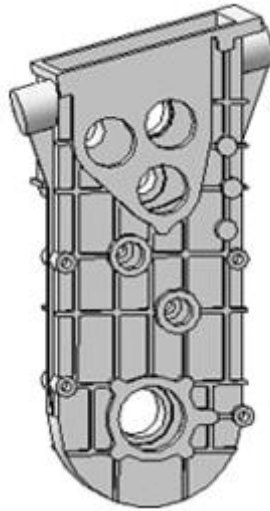


Рисунок 3.1011 Вилівок «Корпус коробки передач снігоходу»

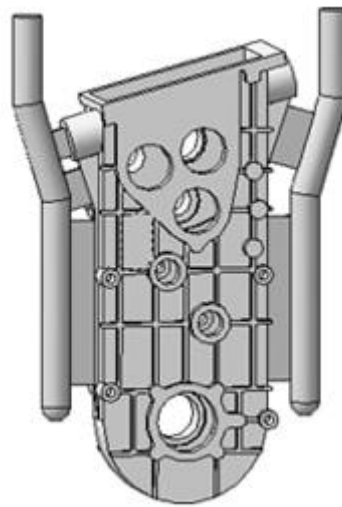


Рисунок 3.11 Вилівка «Корпус коробки передач з ЛПС»

3. Визначимо витрату металу, за формулою:

$$Q = 0,18 \cdot 0,14 \cdot 0,0045 = 113,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} = 0,25 \text{ кг/с}$$

4. Кут розтікання металу за формулою:

$$\varphi = 0,4 \cdot (113,4 \cdot 10^{-6})^{0,195} \cdot 0,004^{-1,09} = 27,96^\circ$$

5. Швидкість поперечного розтікання, за формулою:

$$v_p = \sqrt[3]{12 \cdot \frac{113,4 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,002} \cdot \sin 27,96} = 0,24 \text{ м/с}$$

6. Розрахуємо висоту потоку розплаву, що розтікається поверхнею застійної зони, за формулою:

$$h_p = \sqrt[3]{\left(\frac{113,4 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 2 \cdot 0,002}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sin 27,96}} = 0,12 \text{ м}$$

7. Знайдемо відношення площі поперечного перерізу розплаву, що розтікається, до його периметру, за формулою:

$$l_0 = \frac{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 0,002}{2 \cdot 0,12 + 2 \cdot 0,002} = 0,0039$$

8. Визначаємо критерії Пекле та Нуссельта, за формулами:

$$Re_{\delta_{ж}} = \frac{0,24 \cdot 0,0039}{3,4 \cdot 10^{-5}} = 27,53,$$

$$Nu_{\delta_{ж}} = \frac{1}{2,78} 0,00597 \cdot 27,53^{1,52} = 0,36$$

9. Коефіцієнт тепловіддачі за формулою:

$$\alpha = \frac{83 \cdot 0,36}{0,002} = 14940 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Оскільки вилівок з одного боку оформляється металевою формою з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 14940 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, а внутрішня її порожнина оформляється піщаним стрижнем з $\alpha = 9000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, то загальний коефіцієнт тепловіддачі становитиме:

$$\alpha_{\text{заг}} = \frac{14940 + 9000}{2} = 11970 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

10. Визначаємо максимальну довжину розтікання розплаву, за формулою:

$$L_{p_{\text{макс}}} = \frac{\ln \frac{1033 - 293}{878 - 293} \cdot 1247 \cdot 2200 \cdot 0,004 \cdot 0,24 \cdot \left(1 + \frac{20000}{14000}\right)}{11970} = 0,13 \text{ м}$$

11. Порівнюємо максимальну довжину розтікання $L_{p_{\text{макс}}} = 0,13 \text{ м}$ з довжиною виливка $L_{\text{відл}} = 0,18 \text{ м}$. Повинна виконуватися умова:

$$L_p \geq 1,2 \cdot L,$$

Так як заливка проводиться з двох сторін, то довжину виливки ділимо пополам, таким чином:

$$L_p \geq 1,2 \cdot (L/2) \rightarrow 0,13 \text{ м} > 0,108 \text{ м}$$

Умова виконується, з чого випливає, що дана вилівок заливається із застосуванням вертикально-щілинної літніково-живильної системи.

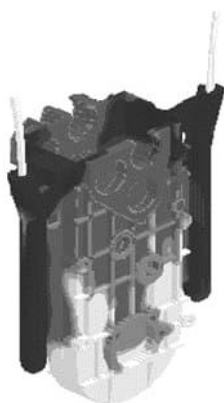
Результати моделювання вилівка «Корпус» у програмі LVM Flow-3D представлені на рис. 3.12.



а) Час заповнення: 8,68 с.
Заповнено: 32,5%;
Рідка фаза: 737%.



б) Час заповнення: 16,14;
Заповнено: 60,4%;
Рідка фаза: 59,3%



в) Час заповнення: 20,89;
Заповнено: 78,3%;
Рідка фаза: 51,8%



г) Час заповнення: 26,64;
Заповнено: 100%;
Рідка фаза: 45%.

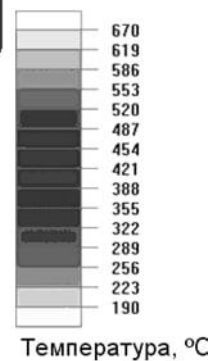


Рисунок 3.12 Етапи заповнення форми:

а, б, в, г - різний відсоток заповнення форми.

Усадочні дефекти, виявлені після закінчення затвердіння вилівка, представлені на рис. 3.13.

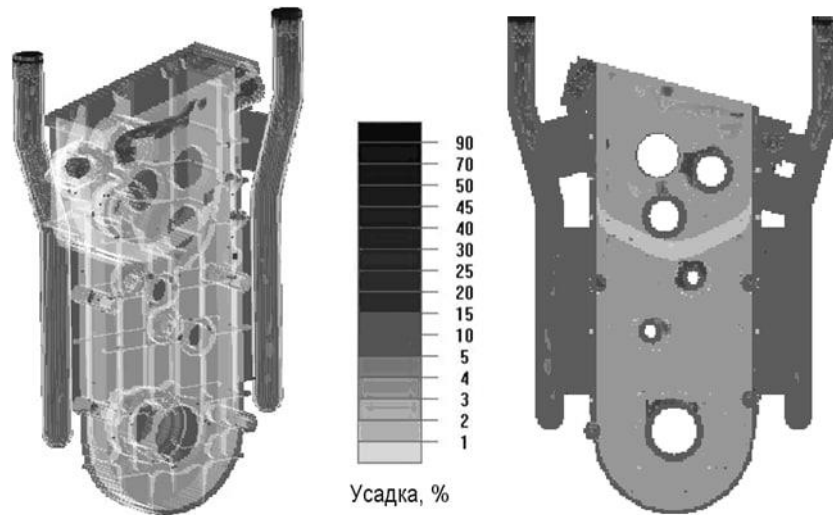


Рисунок 3.1312 Усадочні дефекти на виливку «Корпус»

Аналіз результатів моделювання процесу заповнення та затвердіння виливки «Корпус» показав, що для запобігання усадкових дефектів необхідно на теплові вузли поставити прибуток, але оскільки деякі теплові вузли неможливо забезпечити додатковим живленням, то в область їхнього розташування необхідно встановити холодильники.

Розрахунок прибутку для виливки "Корпус".

1. Обсяг прибутку $V_{п}$ визначаємо за методом Пржибула, по формулі:

$$V_{п} = \frac{\beta \cdot \varepsilon'_V}{1 - \beta \cdot \varepsilon'_V} \cdot V_0, \text{ м}^3$$

де β – коефіцієнт неекономічності прибутку;

$\beta = 10$ – для закритих прибутків;

ε'_V – частина об'ємної усадки сплаву, яка бере участь у формуванні усадкової раковини;

$\varepsilon'_V = 0,043 - 0,045$ – для Al сплавів;

V_0 - обсяг виливка або вузла, що живиться, м³;

2. Об'єм вузла живлення в місці підведення живильника, як і всі інші параметри, ми знаходимо з розмірів усадкової раковини, отриманих за результатом моделювання затвердіння виливка: $V_{01} = 500$ м³.

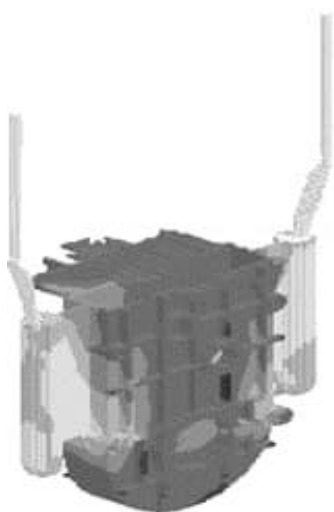
Знаходимо обсяг прибутку за формулою:

$$V_{п1} = \frac{10 \cdot 0,045}{1 - 10 \cdot 0,045} \cdot 500 = 409 \text{ см}^3$$

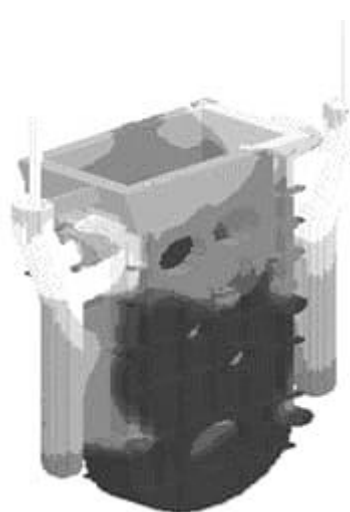
3. Висота прибутку $h_{п}$ дорівнює:

$$h_{п1} = \frac{V_{п}}{S_{п}} = \frac{409}{40,5} = 10,1 \text{ см}$$

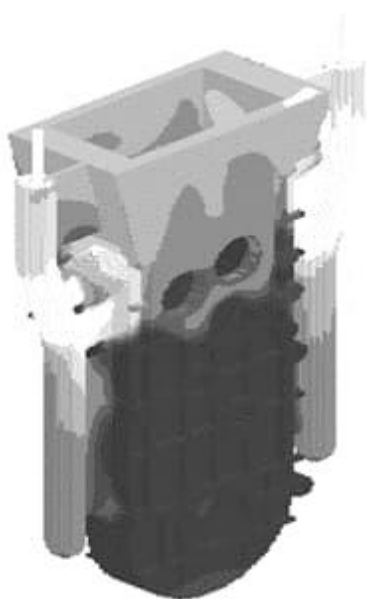
Результати розрахунку вилівка "Корпус" з прибутком представлені на рис. 3.14.



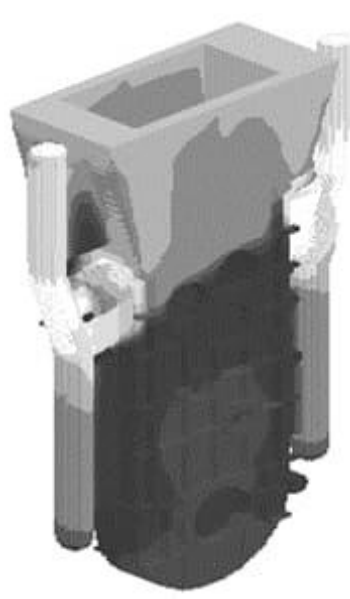
а) Час заповнення: 11,24;
Заповнено: 32,3%;
Рідка фаза: 71,8%;



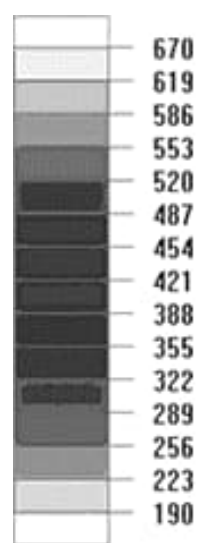
б) Час заповнення: 21,44;
Заповнено: 61,5%;
Рідка фаза: 48,3%;



в) Час заповнення: 27,51;
Заповнено: 78,9%;
Рідка фаза: 45,5%;



г) Час заповнення: 34,60;
Заповнено: 100%;
Рідка фаза: 45,9%;



Температура, °С

Рисунок 3.1413 Етапи заповнення форми:

а, б, в, г - різний відсоток заповнення форми

Усадочні дефекти із застосуванням прибутку та холодильників, виявлені після закінчення затвердіння вилівка, представлені на рис. 3.15.

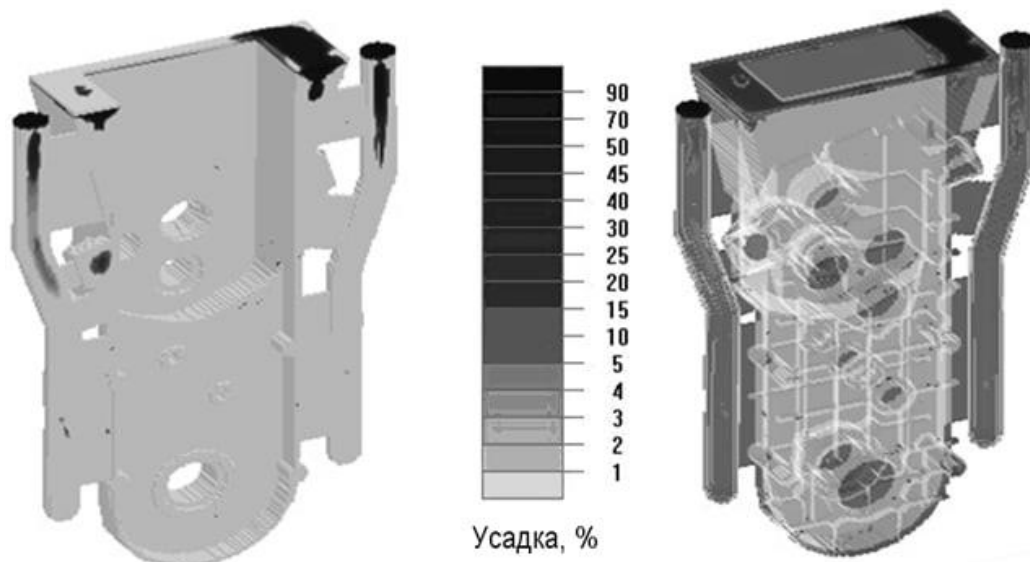


Рисунок 3.1514 Усадочні дефекти на виливку «Корпус»

З результатів моделювання видно, що після застосування прибутку і холодильників дефекти усадки скоротилися, отже, виливок «Корпус» може відливатися із застосуванням вертикально-щілинного підведення металу тільки з використанням прибутку та холодильників.

ВИСНОВОК

На основі розвитку теоретичних положень, узагальнення експериментальних даних та виробничого досвіду розроблена методологія проектування литниково-живильних систем для виливків з легких сплавів, що включає розв'язання задачі початкового етапу проектування та розрахунку виконуваних розмірів литниково-живильних систем, які можна розглядати як вихідний варіант, що передається в САМ-систему. Впровадження методик проектування та розрахунку литниково-живильних систем дозволить скоротити час технологічної підготовки виробництва та забезпечити зниження рівня браку виливків з «вини» литникових систем.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Техніко-економічна оцінка є ключовим етапом дослідження, який дозволяє оцінити реальну ефективність запропонованих рішень. Метою оцінки є визначення, наскільки оптимізація литникової системи сприяє покращенню якості виливків, скороченню витрат і підвищенню рентабельності виробництва.

Для визначення основних аспектів оцінки передбачається:

1. Технічна ефективність — зменшення браку, підвищення точності відливок.
2. Економічна ефективність — зниження матеріальних та енергетичних витрат.
3. Соціально-економічні результати — екологічна безпека, створення робочих місць.

Для аналізу було використано конкретні дані. Матеріалом для виливків обрано алюмінієвий сплав марки АК7, вилівок має вагу 12,28 кг. Цей сплав має високу міцність і корозійну стійкість. Лиття виконувалося, в піщану форму, що забезпечує високу точність і якість поверхні.

Для аналізу вихідних даних на основі проведених попередньо досліджень нами були виявлені проблеми, характерні для базового варіанта лиття:

1. В результаті технологічного дослідження було вибрано конкретну оптимальну литникову систему, базовий варіант якої має технічні недоліки:
 - Високий рівень дефектів через нерівномірне заповнення форм.
 - Утворення застійних зон і спаю потоків у литниковій системі.
 - Значні втрати металу у вигляді залишків у литниковій системі.
2. Що з економічної точки зору означає:
 - Високі витрати на метал та енергію через неефективне заповнення форм.
 - Підвищений рівень браку знижує рентабельність виробництва.

Після впровадження оптимізації очікується вирішення цих проблем.

Технічна ефективність оптимізації забезпечить зменшення дефектів:

- Базовий варіант литникової системи мав кілька суттєвих недоліків: нерівномірне заповнення форм, застійні зони, спаювання потоків і утворення газових пор. Це призводило до високого рівня браку, який становив 20%. Ці дані взято з виробничих звітів підприємства, що виконувало лиття марки алюмінію АК7 в піщано-глинясті форми із

використанням стандартної конструкції литникових систем, без урахування впливу змінних параметрів.

- Після впровадження оптимізованої системи дефекти знизилися до 12%. Цього було досягнуто завдяки кільком ключовим змінам у технології.

Це стало можливим завдяки:

1. Розрахунку оптимальної швидкості та тиску потоку
У базовому варіанті швидкість потоку була 2,5–3 м/с, що спричиняло завихрення металу і нерівномірність заповнення форми. Після оптимізації швидкість була знижена до 1,8–2 м/с, що забезпечило більш спокійне заповнення і значне зменшення утворення газових пор. Тиск у литниковій системі було адаптовано під нову конструкцію, що дозволило уникнути вторинного шлакоутворення.
2. Покращенню геометрії литникових каналів для рівномірного заповнення форм. У базовій конструкції застосовувалася ярусна литникова система з нерівномірними перерізами каналів, що створювало локальні перегріву. Оптимізована вертикально-щілинна система забезпечила рівномірне заповнення форми завдяки покращеній пропускній здатності каналів і підвищенню спрямованості потоку.

Економію матеріалів було розраховано на прикладі лиття виливка «корпус», з марки алюмінію АК7, вагою 12,28 кг, литтям в піщано-глинясту форму, економія матеріалів відбувається завдяки:

1. Скороченню маси залишків металу у литниковій системі
 - У базовій системі: маса залишків становила 20% від загальної маси виливки. Для розрахункової виливки масою 12,28 кг залишки склали 2,456 кг.

Таблиця 4.1 Економія матеріалів за рахунок скорочення залишків

Параметр	Частка у загальній масі (%)	Маса залишків (кг)
Базовий варіант	20	2,456
Оптимізований варіант	12	1,474

- У оптимізованій системі: маса залишків зменшилася до 12%, відповідно для розрахункової виливки масою 12,28 кг залишки склали 1,474 кг для тієї ж виливки.

Економічний ефект шляхом зменшення витрат на матеріали:

- До впровадження: витрати металу на залишки і брак склали 20% від загальної маси. Візьмемо 1000 виливок на річну програму, та порахуємо для 12280 кг металу 20% браку, який в свою чергу складає 2456 кг.
- Після впровадження: витрати знизилися до 12%, тобто до 1474 кг. Браку стало менше на: $2456 \text{ кг} - 1474 \text{ кг} = 982 \text{ кг}$.
- Економія за рахунок зменшення браку на 982 кг, за ціною 155 грн. за кг, складає: $982 \times 155 = 152210 \text{ грн}$.

Розрахунок економії:

$$E_{\text{мат}} = \Delta M \times C_{\text{мат}} \text{ Де:}$$

$$\Delta M = 2456 \text{ кг} - 1474 \text{ кг} = 982 \text{ кг};$$

$$C_{\text{мат}} = 155 \text{ грн./кг},$$

де:

- ΔM – скорочення маси витрат (кг).
- $C_{\text{мат}}$ – вартість металу (грн./кг).

$$E_{\text{мат}} = 982 \times 155 = 152210 \text{ грн./рік}.$$

Економія енергії:

1. Скорочення часу заливки на 17,65% дозволило зменшити витрати енергії на 14,3%.
2. Базові витрати енергії для 12280 тонн виробництва становили 14736 кВт·год (орієнтовна ціна для промислових підприємств в 2024 році 8 грн. за кВт·год), в свою чергу це 117888 грн за 14736 кВт·год.
3. Після оптимізації — 12894 кВт·год (орієнтовна ціна для промислових підприємств в 2024 році 8 грн. за кВт·год), це 103152 грн.
4. Базові витрати енергії на 1 відливку вагою 12.28 кг складає: $12,28 \times 1,2 = 14,736$ (кВт·год).
5. Базова вартість енергії на 1 виливку вагою 12.28 кг складає: $14,736 \times 8 = 117,89$ грн.
6. Оптимізована витрата енергії на 1 виливку вагою 12.28 кг складає: $12,28 \times 1,05 = 12,894$ (кВт·год).
7. Оптимізована вартість енергії на 1 виливку вагою 12.28 кг складає: $12,894 \times 8 = 103,15$ грн.
8. Економія коштів на енергії на 1 виливку вагою 12.28 кг складає: $117,89 \text{ грн.} - 103,15 \text{ грн.} = 14,74$ грн.
9. Базова витрата енергії на 1 кг металу: $14,736 : 12,28 = 1,2$ кВт·год/кг.
10. Оптимізована витрата енергії на 1 кг металу: $12,894 : 12,28 = 1,05$ кВт·год/кг.

Таблиця 4.2 Енергетичні витрати

Параметр	Базовий варіант	Оптимізований варіант	Економія (%)
Витрати енергії на 1 вилівок (кВт·год)	1,2	1,05	12,5
Загальні витрати енергії (кВт·год)	14 736	13 100	11,1

Економічні показники рентабельності виробництва:

Розрахунок приросту рентабельності: $\Delta R = \Sigma E / \Delta C$,

де:

ΣE — Отримана економія, за рахунок зменшення вартості матеріалів і енергії, ΔC — зміна собівартості.

Собівартість в базовому варіанті розраховувалася з урахуванням браку: 12280 кг + 2456 кг = 14736 кг. А також з додаванням витрат на електро енергію, для виготовлення 1000 виливок.

Собівартість в оптимізованому варіанті розраховувалася з урахуванням браку: 12280 кг + 1474 кг = 13754 кг. А також з додаванням витрат на електро енергію, для виготовлення 1000 виливок.

Собівартість в базовому варіанті складає: $14736 \times 155 + 117888 = 2401968$ грн.

Собівартість в оптимізованому варіанті складає: $12984 \times 155 + 103152 = 2115775$ грн.

- Для 1 000 шт виливок з економією на матеріалах, собівартість знижується з 2284080 до 2012520, різниця складає 271560 грн.
- Для 1 000 шт виливок з економією енергії 13,5% собівартість знижується на: 7571 грн.

Таблиця 4.3 Економічна ефективність матеріалів та енергії

Параметр	Вартість (грн) базовий	Вартість (грн) оптимізований	Економія (грн)	Скорочення (%)
Метал	2 284 080	2 012 520	271 560	13,5
Енергія	117 888	103 152	14 736	14,3
Сумарна економія	2 401 968	2 115 672	286 296	13,5

З урахуванням даних таблиці 4.3 отримуємо приріст рентабельності від економії матеріалів

$$\Delta R_m = 286296/271560 = 1,054, \text{ що означає приріст рентабельності } 5,4\%.$$

З урахуванням даних таблиці 4.3 отримуємо приріст рентабельності по енергії:

$$\Delta R_{en} = 117888/103152 = 1,143, \text{ або приріст } 14,3\%.$$

Наявність приросту рентабельності дозволяє підтвердити доцільність заміни литникової системи за нашим варіантом лиття.

Висновки

За рахунок оптимізації литникової системи було отримано економію на металі, яка склала 271560 грн., цього було досягнуто за рахунок зменшення рівня браку і втрати металу в процесі заливки.

Економія електро енергії склала 14736 грн., за рахунок скорочення часу заливки.

Отримано приріст рентабельності від економії використання металу і енергії, що доводить ефективність нашої пропозицій.

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

5.1 Характеристика шкідливих і небезпечних факторів

Основні шкідливі фактори:

1. Теплове випромінювання:
 - Температура розплаву досягає 750°C, що створює значне теплове навантаження на персонал у зоні заливки.
 - Інтенсивне теплове випромінювання збільшує ризик теплового стресу або опіків.
2. Токсичні викиди:
 - Пари оксидів алюмінію можуть подразнювати слизові оболонки дихальних шляхів.
 - Охолодження форм супроводжується утворенням пилу, що містить кварцові частки.
3. Механічні ризики:
 - Розлив розплаву у разі пошкодження системи каналів.
 - Можливий обвал частин форми через порушення температурних режимів.

Удосконалення для зменшення впливу:

1. Автоматизація процесу:
 - Заливка виконується механізованими системами, що зменшує необхідність прямої участі персоналу.
 - Всі операції контролюються дистанційно з використанням датчиків температури та швидкості потоку.
2. Захисні засоби:
 - Вогнетривкий спецодяг, захисні окуляри та маски з фільтрами.
 - Тепловідбиваючі щити для захисту працівників, які перебувають біля зони заливки.
3. Системи вентиляції:
 - Локальна витяжна вентиляція над чашею литникової системи усуває токсичні пари та пил.

ВИСНОВКИ

Робота спрямована на оптимізацію технології виготовлення виливків із алюмінієвих сплавів шляхом удосконалення литникових систем, що дозволило покращити якість продукції та знизити витрати. Запропоновані зміни були розроблені на основі аналізу сучасних технологій, математичного моделювання та експериментальних досліджень. Результати підтвердили ефективність модернізації: вдалося зменшити дефекти лиття та оптимізувати виробничі витрати. Техніко-економічна оцінка довела рентабельність впроваджених змін, а оцінка умов праці показала їх позитивний вплив на безпеку та екологічність процесів. Таким чином, реалізовані вдосконалення забезпечують підвищення ефективності виробництва та відповідають вимогам сучасної промисловості.

В ході роботи було виконано аналіз сучасних технологій лиття та визначено ключові недоліки існуючих рішень. Математичне моделювання процесів дозволило розробити оптимальні конструкції литникових систем, що були підтверджені експериментально. Запропоновані зміни забезпечили зниження рівня дефектів у готових виробах, зменшення витрат на виробництво. Техніко-економічна оцінка підтвердила доцільність впровадження удосконалень. Окремо проведена оцінка умов праці продемонструвала позитивний вплив змін на безпеку виробничих процесів. Таким чином, комплексний підхід до модернізації технології лиття алюмінієвих сплавів досяг поставленої мети та створив передумови для подальшого розвитку галузі.