

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: Дослідження теплових процесів при виготовленні виливків із литими
функціональними шарами

Виконав: магістрант групи ЛВ-23-1м _____ Студенець Б.
Керівник випускної роботи _____ Саїтгарєєв Л.Н.
Нормоконтролер _____ Саїтгарєєв Л.Н.
Завідувач кафедри _____ Савельєв С.Г.

Кривий Ріг
2024р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка на кваліфікаційну роботу магістра: «Дослідження теплових процесів при виготовленні виливків із литими функціональними шарами»: с., рисунків., таблиць., літературних джерел.

У розділі 1 розглянуто різні способи отримання виливків з функціональними шарами.

У розділі 2 розглянуто теорію теплопровідності, нестационарну теплопровідність, методи розв'язання задач нестационарної теплопровідності, теплопередачу через плоску стінку,

У розділі 3 наведено результати моделювання створення на поверхні виливка функціонального шару і розраховано зміну у часі температурного поля пластинки для обґрунтування умов якісного сплавлення шарів .

У розділі 4 визначено економічну ефективність отримання литих функціональних шарів різними способами.

У розділі 5 розроблені заходи щодо забезпечення безпеки роботи під час процесу лиття функціональних шарів.

ВИЛИВОК, ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ШАР, ОСНОВА, ПОВЕРХНЯ,
ЛЕГУВАННЯ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА,
ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ,

Вступ

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ШАРАМИ
 - 1.1. Особливості отримання біметалевих виливків
 - 1.1.1. Виготовлення біметалевих втулок
 - 1.1.2. Виготовлення біметалевих валків прокатних станів
 - 1.2. . Особливості локального об'ємного легування
2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОТРИМАННІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ШАРУ
 - 2.1 Теплопередача через плоску стінку
 - 2.2 Температурне поле пластини основи виливка
 - 2.3 Методика розрахунку зміни температурного поля пластинки і температури середовища із зміною часу
 - 2.3.1. Постановка задачі
 - 2.3.2 Алгоритм розрахунку
3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ ВЗАЄМОДІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ОТРИМАННІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ШАРУ ВИЛИВКА ІЗ ТЕРМІТНОГО РОЗПЛАВУ
- 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА
- 5 САНІТАРНО - ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО - ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ
- ВИСНОВКИ
- СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Сучасний етап розвитку ливарного виробництва характеризується створенням принципово нових технологічних процесів виробництва виливків, які дають змогу розв'язати проблему підвищення якості швидкозношуваних деталей машин і механізмів.

Ця проблема найповніше розв'язується під час виготовлення виливків із диференційованими властивостями (біметалевих, армованих, комбінованих, з легованими поверхнями, з локальними легованими об'ємами і т.д.). Тому становить певний інтерес розгляд досліджень з виробництва зносостійких виливків із диференційованими властивостями.

Способи поверхневого та локального легування є найбільш економічними та ефективними під час виробництва зносостійких виливків.

Формування властивостей і товщини легованого функціонального шару залежно від конкретних умов визначається різними фізико-хімічними процесами, серед яких переважають розплавлення, розчинення, фільтрація і змочуваність легувальної пасти залізвуглецевим сплавом. Функціональний шар на поверхні або в певному об'ємі виливки утворюється під час розчинення легувальних елементів у рідкому металі. У цих умовах протікають дифузійні процеси в рідкій і твердій фазах основного металу виливки.

Процес поверхневого легування чавунних виливків дає змогу забезпечити високу поверхневу твердість виробам із в'язкою та пластичною серцевиною. Важливою перевагою цього способу є те, що він не потребує встановлення спеціального обладнання та додаткових площ, не подовжує цикл виготовлення виливків і дає змогу отримувати їх диференційованими за хімічним складом і твердістю, що особливо цінно під час роботи в екстремальних умовах.

У роботі запропонований альтернативний метод створення функціонального шару методом СВС наплавлення порошкової стрічки зварюванням. Суть запропонованого методу в тому, що на підготовлену поверхню виливка насипається порошок необхідного хімічного складу та екзотермічна суміш до складу якої входить: металічна основа і термітна суміш. Підготовка поверхні виливка також включає в себе очищення, знежирення і підігрів разом із екзотермічною сумішшю. За рахунок високих температур при СВС відбувається розплавлення та приєднання шарів основи та термітного металу.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ШАРАМИ

1.1. Особливості отримання біметалевих виливків

1.1.1. Виготовлення біметалевих втулок

У машинобудуванні литі біметалеві деталі типу втулок дають змогу різко знизити норми витрат кольорових сплавів на одиницю продукції. Одночасно підвищуються їхні експлуатаційні властивості. Так, втулки з олов'яно-свинцевих сплавів витримують за окружної швидкості 1,5 м/с тиск до 300 кгс/см², тоді як біметалеві втулки за окружної швидкості 2,0 м/с витримують тиск до 500 кгс/см².

До підшипникових антифрикційних сплавів, що утворюють внутрішній шар біметалевих втулок, відносяться бронзи (олов'яні, олов'яно-фосфористі, свинцеві, алюмінієві), латуні, алюмінієві сплави, бабіти.

Успіх отримання якісних біметалевих заготовок, що мають форму тіла обертання, залежить від таких чинників:

- 1) підготовки внутрішньої поверхні, основи, що заливається відповідним антифрикційним розплавом;
- 2) ретельного приготування розплаву;
- 3) дотримання температурних режимів основи (до заливки);
- 4) суворого виконання всього технологічного циклу виготовлення біметалевої заготовки.

Матеріалом основи заготовки служить м'яка сталь, що містить до 0,30% вуглецю. Практика показала, що більш високий вміст вуглецю в сталі або застосування легованих сталей не забезпечує належного зчеплення основи з антифрикційним розплавом. У разі застосування чавунної основи вона повинна містити мінімум графіту. Твердість чавунної основи має бути НВ 180-220.

Для двошарових заготовок малих діаметрів основу виготовляють із безшовної труби, а для більших діаметрів - із поковок або виливків з попереднім відпалом.

До одного з недоліків відцентрового способу отримання біметалевих підшипників можна віднести ліквідацію розплаву, насамперед у свинцевистих бронзах і бабітах. Водночас, низкою технологічних прийомів - зменшенням товщини шару розплаву, що заливається, форсуванням охолодження і зменшенням швидкості обертання форми цей дефект може бути зведений до мінімуму.

Технологія отримання біметалевих виробів розплавленням твердої шихти безпосередньо в порожнині основи має такі різновиди.

- 1) розплавлення шихти поза машиною (у печі);
- 2) розплавлення шихти на машині за допомогою електродуги;
- 3) розплавлення шихти на машині індукційним нагріванням.

При розплавленні шихти внутрішнього шару в печі основу по довжині відрізають від сталевий труби, до якої з торців приварюють кришки з листового заліза (10-14 мм), одна з них глуха, а інша має отвір діаметром 2-4 мм, призначений для виходу газів, що утворюються в процесі розплавлення шихти в порожнині основи.

Для забезпечення міцного з'єднання бронзи й основи внутрішня поверхня останньої має бути вільна від іржі та масла. Тому її піддають ретельній обробці. Після обробки основи не повинна мати рисок і шорсткостей, що забезпечує мінімальне розчинення заліза в бронзі.

Спочатку основа і кришки проходять травлення в 20% розчині соляної кислоти з подальшою нейтралізацією в 10% розчині лугу і промиванням у гарячій проточній воді за 80° С. Потім вони знову проходять травлення в 20% розчині соляної кислоти і промиваються в холодній проточній воді. Замість хімічної обробки допускається піскоструминне очищення.

Щоб оберегти оброблену внутрішню поверхню основи від подальшого окислення, її покривають тонким шаром розчину бури. При цьому занурюють основу на 3-5 хв у ванну з гарячим (70-80° С) 3-ним % розчином бури і потім просушують за 160-180 С. Після просушування внутрішню поверхню основи в нагрітому стані обмазують шаром бури (консистенції сметани) 1-1,5 мм. Концентрований розчин бури готують змішуванням 150 г бури в 200 см³ води. Обмазані бурою заготовки просушують протягом 10 хв за 160 - 180° С.

Підготовлену заготовку завантажують бронзою з добавкою 0.5-1% бури від маси бронзи і такої ж кількості деревного вугілля.

У тих випадках, коли в шихті використовується бронзова стружка, яку збирають у механічних цехах, її очищають від заліза двократною сепарацією і прожарюють за 400 °С для видалення масла. Повне знежирення стружки досягається промиванням її протягом 5-10 хв у ванні з 20% розчином каустичної або кальцинованої соди за температури 80-90°С, після чого її промивають від лугу протягом 5-7 хв у проточній воді і ретельно просушують. Для сталевих втулок діаметрами до 100; 100-200; 200-350; 350-450; понад 450 мм товщина шару бронзи становить відповідно 4; 5; 7; 9; 10 мм і після обробки 1,5; 2; 2,5; 3 і 4 мм.

Порцію бронзи визначають за формулою

$$Q = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} ly$$

де D - внутрішній діаметр основи втулки в см; d - внутрішній діаметр бронзового шару виливки в см; l - довжина в см.

Після завантаження шихти основу нагрівають у полум'яній печі, в якій має бути відновлювальна атмосфера. Процес нагріву рекомендується двоступеневий: попередній нагрів до 700 °С у низькотемпературній печі та подальший, що передбачає розплавлення бронзи зі швидкістю нагріву 50-70

град/хв. Форсований режим зменшує ефект розчинення заліза в бронзі. Перегріву заготовки не можна допускати, оскільки він викликає насичення бронзи залізом. Вплив заліза в бронзовому шарі втулки на антифрикційні властивості позначається за вмісту понад 2,5% Fe.

Слідом за розплавленням бронзи заготовки швидко виймають із печі та затискають у трикулачковому самоцентрувальному патроні, закріпленому на валу відцентрової машини або між центрувальними дисками передньої бабки та задньої бабки токарного верстата (рис. 1.1). Швидкості обертання форм під час лиття різних втулок наведено в табл 1.1..

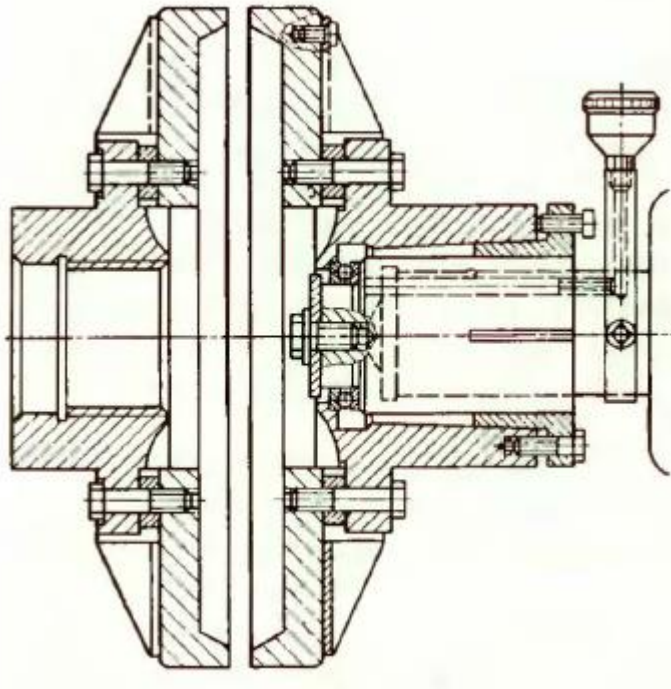


Рис. 1.1. Центрувальні диски

Таблиця 1.1.

Швидкості обертання форм

Внутрішній діаметр біметалічної втулки в мм	Швидкість обертання форми в обор. за хвил.	Гравітаційний коефіцієнт	Внутрішній діаметр біметалічної втулки в мм	Швидкість обертання форми в обор. за хвил.	Гравітаційний коефіцієнт
40-60	1100	40	181-260	700	60
61-90	1000	42	261-320	600	58
91-120	900	46	321-450	500	50
121-180	800	50	451-600	400	48

Заготовка обертається під час інтенсивного охолодження зовнішньої поверхні основи протягом декількох хвилин до температури 500° С. Після цього вимикають обертання. Заготовку видаляють з патрона, і подальше охолодження відбувається на повітрі. Заготовки діаметром понад 250 мм спочатку охолоджують у низькотемпературній печі і від 150-200° С на повітрі.

Для встановлення якості двошарової заготовки втулки зрізають обидві кришки та проглядають внутрішню поверхню бронзового шару втулки, яка

має бути гладкою, склоподібною, після чого проводять розточування. Якщо при цьому виявляться газові раковини, залишки нерозплавленої шихти, різностінність, то втулку бракують. Для перевірки міцності зчеплення бронзового шару й основи кожен втулку простукують. Під час простукування звук має бути чистий, металевий, і якщо звук глухий, то зчеплення недостатньо хороше, і виліток бракують.

Для структурного аналізу від втулки відрізають зразок у вигляді кільця висотою 15-20 мм.

Під час випробування на відшаровування бронзи вирізане кільце стискають до появи тріщин у шарі бронзи.

Якщо бронзовий шар не з'єднався з основою по всій поверхні, то причиною браку є невідповідність обраної марки сталі або недостатнє нагрівання втулки в печі. Якщо бронзовий шар не з'єднався з основою в окремих місцях, то брак є наслідком поганої якості хімічної обробки основи.

Під час організації дільниці для виготовлення біметалевих втулок із розплавленням бронзи необхідно мати таке обладнання: полум'яну піч для нагріву заготовок, верстак для підготовки заготовок під заливання; ванну для травлення заготовок; ванну для промивання заготовок водою після травлення; лужну ванну для знежирення; ваги для зважування шихти бронзи; прес для запресовування стружки; магнітний сепаратор і відцентрову машину.

З метою безпеки шляхи транспортування гарячих заготовок (від печі до відцентрової машини) повинні бути вільними.

Електродуговий спосіб розплавлення полягає в нагріванні бронзи, що знаходиться у внутрішній порожнині основи, теплом, утвореним електричною дугою, що виникає між електродами, встановленими всередині основи. Тепло для розплавлення шихти надходить зсередини, і основа нагрівається менше, ніж у печі або під час індукційного нагрівання. Пристрої для відцентрового лиття втулок з електродуговим нагріванням виконуються з обертовими або необертовими електродами. На рис. 1.2. показано установку з обертовими електродами, в якій використано токарний верстат зі знятою задньою бабкою.

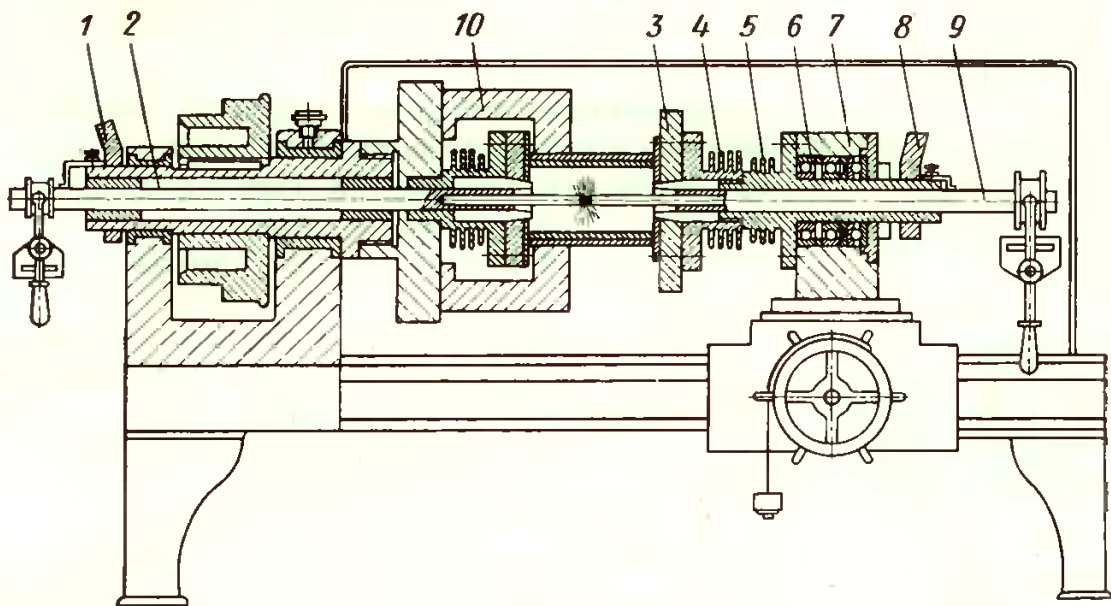


Рис. 1.2. Обладнання для електродугової плавки шихти

Шпиндель 5, що обертається в підшипниках 6, змонтований на супорті різцетримача в коробці 7. Через центральний отвір шпинделя переміщається штанга-електродотримач 9. В отвір шпинделя передньої бабки пропущений лівий електродотримач 2. Патрон з подовженими кулачками 10 центрує основу, а фланці 3 затискають її із зусиллям 200-600 кгс. Напруга на правий електрод подається через щітку 8, кільце і електродотримач 9. Лівий електрод заземлений через передню бабку і станину. Коробка 7 ізольована від супорта, а фланець 3 від шпинделя 5 прокладками. Рукоятка служить для переміщення електрода і розтягування дуги. Ребристі втулки 4 захищають підшипники передньої бабки і шпинделя 5 від нагрітої основи. Усі струмоведучі частини закриті кожухом. При відкиданні кожуха напруга відключається автоматично.

Як матеріал для основи застосовують ферито-перлітний чавун і низьковуглецеву сталь з поковки, прокату або безшовної труби.

Основу до заповнення її бронзовою шихтою і встановлення на верстат обробляють. Шорсткість зовнішньої поверхні повинна бути 6-го класу чистоти, а внутрішньої 7-го класу чистоти.

За електродугового способу нагрівання немає потреби в значній підготовці внутрішньої поверхні основи. Її промивають у 5%-му розчині бури, а внутрішню поверхню, крім того, покривають тонким шаром флюсу. Бронзу застосовують у вигляді стружки, литих паличок і в шматках.

Бронзову стружку під тиском 100-600 кгс/см² запресовують у порожнину основи, як показано на рис. 1.3. При зазначеному тиску бронзова стружка спресовується у вигляді брикету з отвором для проходження електродів.

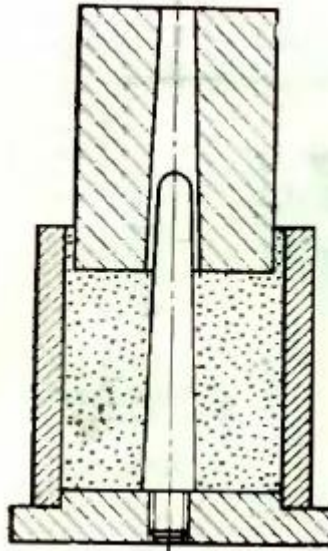


Рис. 1.3. Схема запресування стружки

Бронзу у вигляді шматків або паличок завантажують у порожнину основи в такій послідовності. Спочатку основу встановлюють і затискають у кулачках токарного верстата (з прокладкою азбесту між торцем основи і лівим фланцем), уздовж втулки просувають електрод, потім завантажують бронзу, після чого основу з торця підтискають фланцем супорта з прокладкою азбесту між ними. Під кулачки патрона необхідно підкласти ізоляцію (азбестову), оскільки в іншому випадку вони можуть стати провідниками струму і тим самим порушити процес плавлення. Після зазначеної підготовки вмикають верстат і подають струм до електродів. І

Сила струму в ланцюзі дуги за напруги 180-220 в залежно від внутрішнього діаметра втулки наведена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Сила струму в ланцюгу дуги (ВА) залежно від внутрішнього діаметра втулки

Заготовка	Внутрішній діаметр втулки в мм						
	40-50	51-60	61-80	81-100	101-130	131-170	171-200
Сталева .	60-80	70-80	110-120	120-150	150-200	200-300	270-350
Чавунна .	50-60	60-70	100-120	120-150	150-200	200-300	270-350

Процес розплавлення бронзи закінчується, коли температура на зовнішній поверхні чавунної основи досягає 800-850°C, після чого вимикають струм. Форму зупиняють, коли температура на поверхні втулки знизиться до 500-600°C.

При розплавленні шихти внутрішнього шару токами високої частоти (т. в. ч.) відбувається за рахунок нагрівання т. в. ч. поверхневого шару основи, звідки тепло передається на внутрішню поверхню основи і далі до бронзової шихти.

Технологія виготовлення двошарових втулок за індукційного нагрівання майже не відрізняється від технології виготовлення їх за нагрівання в печах. Основа, заповнена бронзою, нагрівається безпосередньо

на відцентровій машині, призначеній для отримання двошарової заготовки. Основу з кришками встановлюють у центрах машини. У кришках (рис. 1.4) передбачені заплечики, що відповідають товщині стінки заготовки втулки.

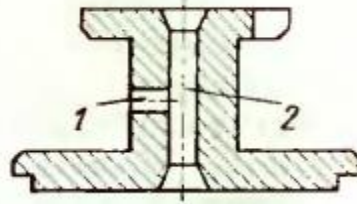


Рис. 1.4. Кришка

Вихід газів, що утворюються в процесі розплавлення бронзи, забезпечується центральним отвором 1 і радіальним 2. Центральний отвір 1 переходить на конус для встановлення заготовки в центрах верстата. Щоб уникнути приварювання розплавленої бронзи до торцевих поверхонь кришок, між ними й основою ставлять азбестові прокладки або хромують торцеві поверхні кришок. Після заповнення основи бронзою і прожареною бурою (1% від маси бронзи) її в зборі з кришками встановлюють у центри верстата і вводять в індуктор, який закріплений на верстаті й відцентрований відносно осі шпинделя.

Заготовка переміщається відносно індуктора під час переміщення столу по напрямних станини.

Після нагрівання основи до температури, що забезпечує розплавлення бронзи, основу виводять з індуктора, накривають кожухом і обертають зі швидкістю, що забезпечує розподіл розплаву по її внутрішній поверхні. Коли поверхня основи остигає до температури 500-600°C, форму зупиняють, відкривають кожух і заготовку-втулку знімають з центрів верстата. Машина для відцентрового лиття двошарових втулок із нагріванням т. в. ч. наведена на рис. 1.5..

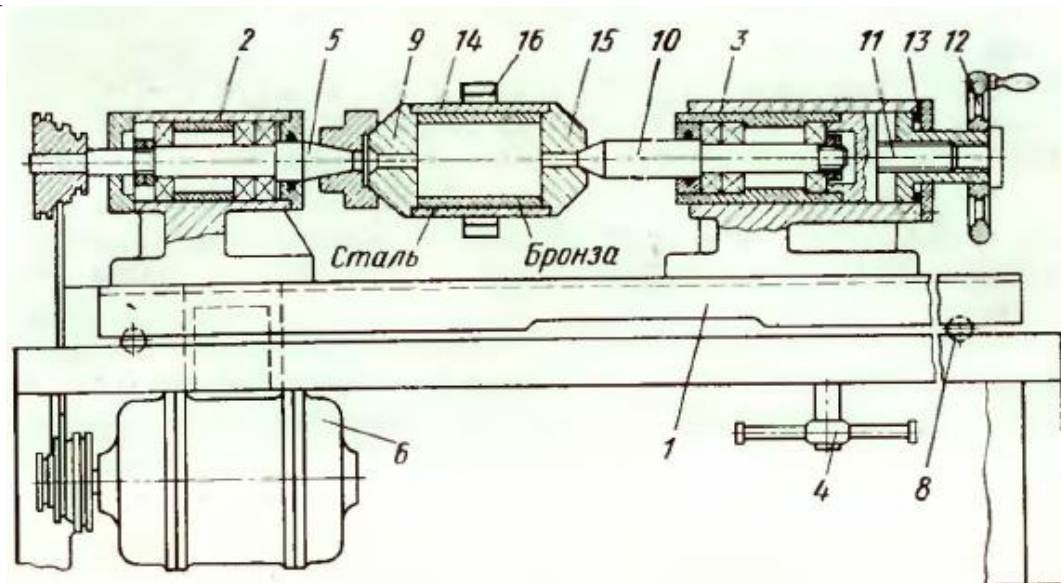


Рис. 1.5. Машина для відцентрового лиття двошарових втулок

На рухомому столі 1 нерухомо закріплена передня бабка 2. По цьому столу переміщається задня бабка 3, що фіксується гвинтом 4. Шпindel 5 у передній бабці змонтований на кулькових опорах. Шпindel має три швидкості обертання від ступеневого шківa електродвигуна 6. Столик 1 на кулькових опорах 8 переміщається вручну вздовж станини 7. Обертання і центрування заготовки здійснюються повідковою шайбою 9, змонтованою на шпindelі 5. Центр 10 задньої бабки, що переміщається уздовж осі від гвинта 11 і маховичка 12, зроблений обертотним. Для компенсації подовження заготовки 14, що нагрівається, в задній бабці передбачена гумова прокладка 13. Зібрану основу-втулку, закриту з торців кришками 15 (змінними залежно від діаметра заготовки), вставляють в індуктор 16 і закріплюють у центрах. Від можливого вихлюпування розплаву на машині встановлено кожух.

Крім зазначених вище способів, існують також методи вільної заливки внутрішнього шару на тверду основу.

Для забезпечення міцного з'єднання шару бронзи з основою остання піддається ретельній хімічній обробці. Зовнішню поверхню основи покривають фарбою, що складається з 60% графіту і 40% крейди (у вигляді порошку), розведених у воді з сульфідною бардою для запобігання окисленню цієї поверхні. Основу нагрівають до 1150° С, встановлюють на відцентрову машину і заливають.

Після заливки бронзи вмикають воду, що охолоджує зовнішню поверхню основи, і коли температура сягне 600-700°С, вмикають охолодження і зупиняють форму, а залиту втулку знімають з машини. Подальше її охолодження до температури 150-200°С потрібно проводити з малою швидкістю. На практиці втулки невеликих розмірів укладають у ящик із піском, а великих розмірів - у піч.

Також розроблено технологію відцентрової заливки сталевих корпусів вкладишів алюмінієвими сплавами, що відрізняються вмістом олова: 9-11% Sn 19-21% Sn.

За цією технологією внутрішню поверхню основи ретельно зачищають, проводять хімічну обробку та алітування. Для алітування основу занурюють у тигель з алюмінієм, температура якого 750-780° С. витримують протягом 1,5-2 хв, потім за 20 секунд до заливки встановлюють її на відцентрову машину і заливають розплавом. Температура заливки 690-710° С. Перед заливанням підігрівають планшайбу і лійку до 150° С, а розливний ківш до 200° С. Після заливки вмикають водяне охолодження.

У втулках *сталь - бабіт* основу піддають травленню міцною соляною кислотою, після чого її промивають і протягом 5-6 хв знежирюють у гарячому 5-10%-му розчині їдкої натру. Температура розчину 70-100° С. Потім заготовку протягом 2-4 хв промивають у гарячій воді (70-100° С). Після цього внутрішню поверхню основи обробляють розчином, отриманим травленням цінко-соляною кислотою (2% за об'ємом) з додаванням 40 г нашатирю на 1 л кислоти і води (1/3 за об'ємом).

Зазвичай зовнішні поверхні, що не підлягають заливці бабітом, фарбують фарбою, що складається з 1 частини порошкоподібної крейди і 3 частин води. У фарбу можна додати рідке скло або кухонну сіль (40 г на 1 л води) Підготовлені зазначеним чином заготовки підігрівають протягом 15-20 сек до температури 150° С і направляють у ванну з розплавленою полудою. Час перебування вкладишів у ванні з полудою залежить від товщини їхніх стінок - від 3 до 10 мм. Витягнуту з ванни заготовку затискають у патрон, встановлений на відцентровій машині, температура якого 100°С. Після введення в порожнину заготовки заливальної воронки (150° С) вмикають машину і виконують заливку бабіту. Через 5-7 с після заливки заготовку інтенсивно охолоджують, і коли температура на її внутрішній поверхні досягає 100-150°С, зупиняють машину і з патрона знімають отриману біметалічну заготовку.

Види і причини браку таких втулок можуть бути такими:

- 1) погане прилягання бабіту до вкладиша спричиняється неякісною підготовкою поверхні вкладиша або низькою його температурою перед заливанням;
- 2) ліквация і усадочні явища спричиняються завищеною температурою бабіту під час заливки і малою швидкістю охолодження заготовки після заливки бабіту,
- 3) різностінність шару бабіту пояснюється неправильним складанням і встановленням вкладиша в патрон машини;
- 4) напливи на поверхні та шаруватість бабіту спричиняються переривчастістю струменів розплаву під час заливки, а також низькою температурою бабіту.

На рис. 1.6. наведено машину моделі ЛМ 473 для заливання вкладишів діаметром до 300 мм і довжиною до 250 мм. На зварній станині змонтовані дві опори шарикопідшипника з порожнистим шпинделем. На шпиндель на гвинтовій нарізці насаджений диск із трьома тягами. З протилежного боку на цих тягах розташовані передня план-шайба і дві пластини. На ці пластини встановлюють підготовлений до заливки бабітом вкладиш, що затискається задньою планшайбою, закріпленою на штоку. Шток переміщається уздовж осі в шпинделі.

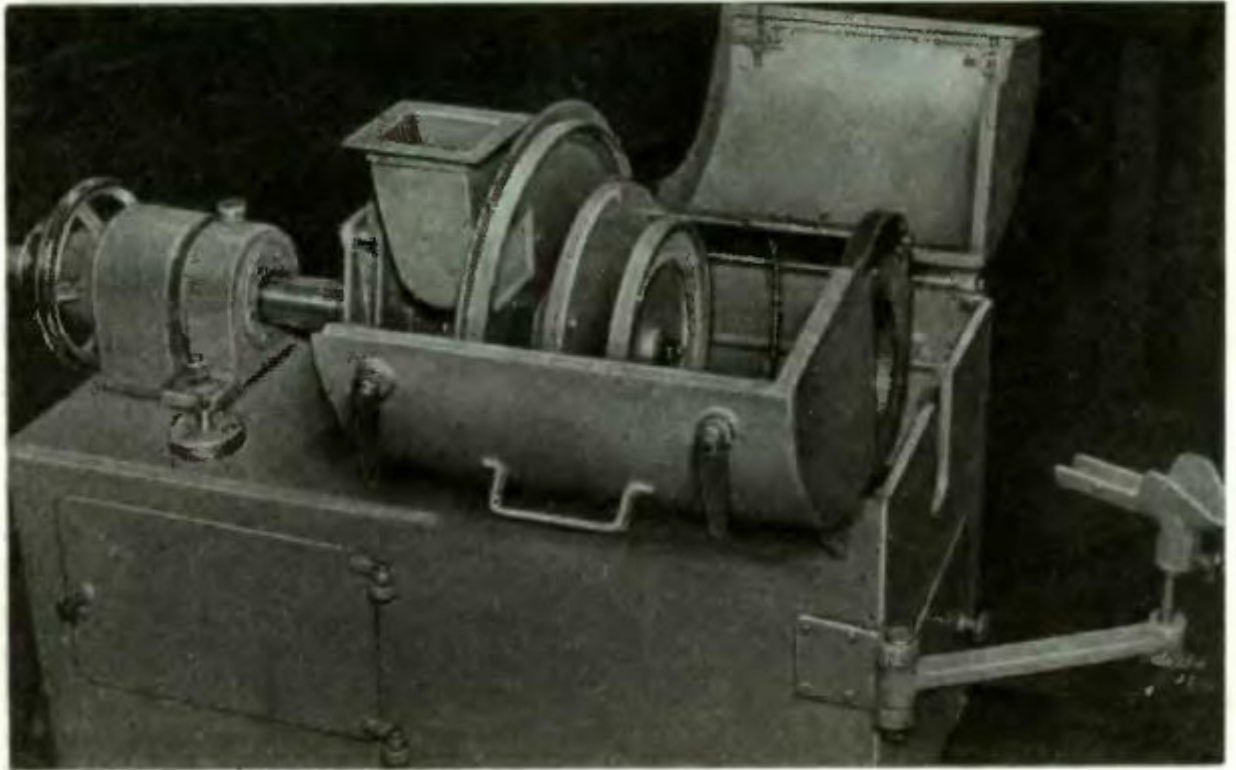


Рис. 1.6. Машина для заливання бабітом вкладишів підшипників невеликих габаритів

Вкладиш притискається маховиком, до якого прикріплена гайка з внутрішньою нарізкою. Під час обертання маховика шток переміщається вздовж шпинделя, і задня планшайба притискає втулку до планшайби, що стоїть перед нею. Габаритні розміри машини $1500 \times 1000 \times 1000$ мм, маса її 882 кг.

Машина має три швидкості обертання:

930 об/хв при зовнішньому діаметрі вкладишів 100-150 мм;

664 об/хв при діаметрі 100-250 мм;

465 об/хв при діаметрі 250-300 мм

Відцентровим способом виготовляють також великогабаритні біметалеві вкладиші підшипників рідинного тертя для прокатних станів. Машина для відцентрової заливки великогабаритних вкладишів (рис. 1.7) складається з планшайби 5 з напрямним конічним виступом 7 і прихватів 6. Планшайба розташована на шпинделі. Привід обертання шпинделя складається з електродвигуна 1, варіатора 2 і пасової передачі 3. Привід 4 служить для повільного обертання шпинделя 8.

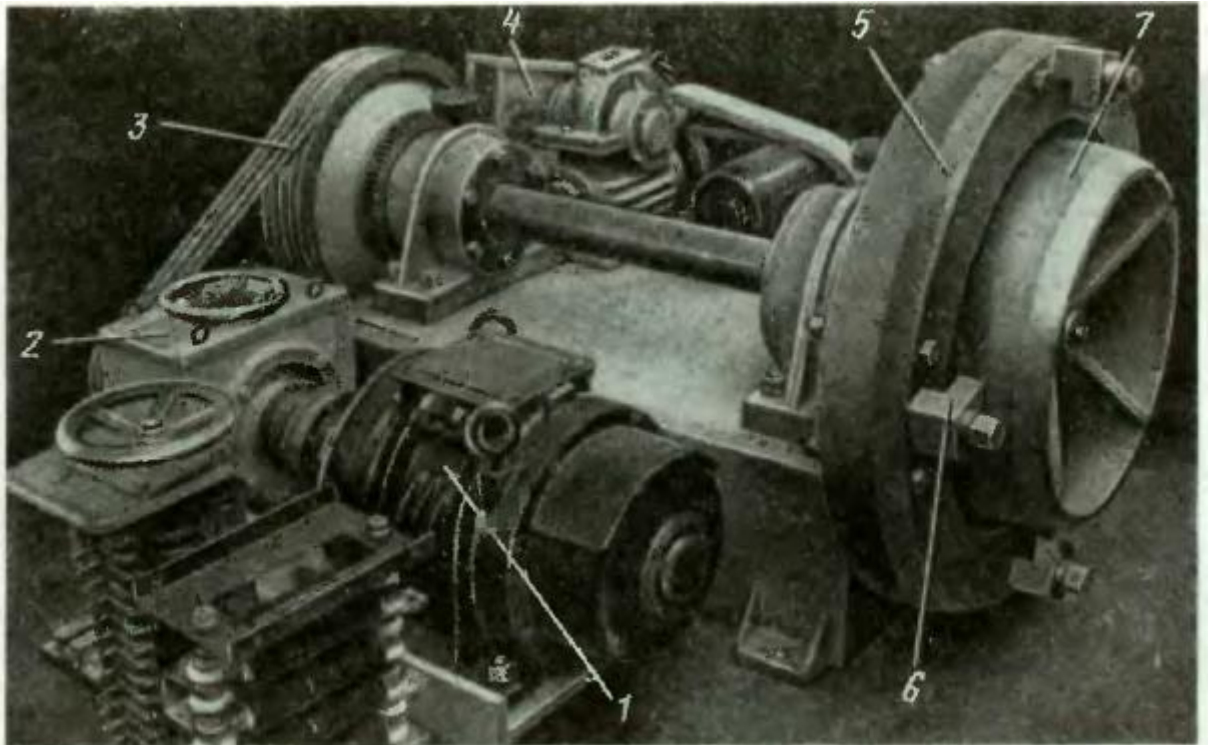


Рис. 1.7. Відцентрова машина для заливання бабітом великогабаритних вкладишів підшипників прокатних станів

Заливку великогабаритних вкладишів прокатних станів виробляють високоолов'янистим бабітом. Технологічну схему процесу показано на рис 1.8.

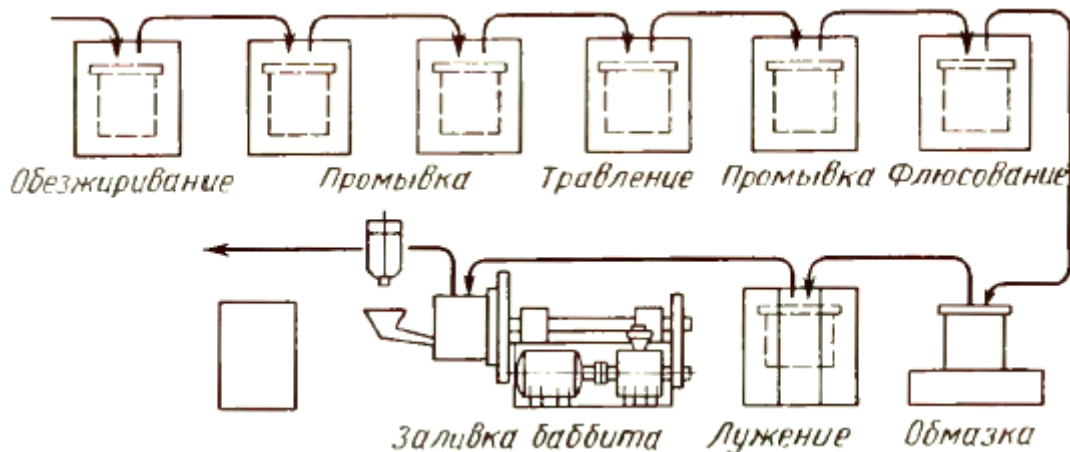


Рис. 1.8. Схема технологічного процесу заливки бабітом вкладишів підшипників прокатних станів і розташування обладнання

Після хімічної підготовки основи (вкладиша) її швидко встановлюють на планшайбі 5 відцентрової машини і закріплюють хватами 6 (див. рис. 1.7). Формі повідомляють обертання спочатку 15-60 об/хв (залежно від діаметра втулки) і заливають невелику порцію олова, достатню для змочування всієї внутрішньої поверхні. Після цього на поверхню насипають флюс, вмикають швидке обертання шпинделя і заливають бабіт. Через 40-50 сек після заливки вмикають водяне охолодження, щоб охолодити заготовку до 50-60° С протягом 5-8 хв.

Відцентрові машини для заливки вкладишів підшипників бабітом можуть бути використані також для заливки вкладишів бронзою та іншими розплавами.

Метод послідовної заливки шарів металу.

Шлакові та інші неметалеві забруднення з внутрішньої поверхні першого шару спливають через другий рідкий шар на його внутрішню поверхню. Цим способом можуть бути отримані двошарові заготовки зі всіляких сплавів. Між шарами металу утворюється перехідна зона, яка за своїм хімічним складом відповідає проміжному складу обох залитих сплавів. Основним фактором, що визначає величину перехідної зони, є, згідно з даними І. М. Поздишева, тривалість перерви між заливкою першого і другого шарів. Якщо проводити заливку без перерви, то другий шар як самостійний не виділяється, оскільки шари перемішуються.

Нижче наведено деякі склади сплавів і технологічні дані про заливку.

Втулки зі сталі та бронзи мали такий склад:

1) сталь: 0,05-0,2% С, 0,2-0,25% Si, 0,6-0,8% Mn, 0,05-0,08% S, 0,05-0,09% P;

2) бронза: 80% Сі, 3,0-4,0% Si, 3,04,0% Рь, решта Zn.

Температура сталі перед заливкою 1500-1550°C, бронзи 1100-1150°C. Температура виливниці перед заливкою 150-200° С, окружна швидкість її 8 м/сек. Тривалість витримки після заливки сталі до заливки бронзи становить 15-25 сек. При цьому досягається найбільш якісне з'єднання обох сплавів між собою. Значне збільшення витримки викликає розшарування.

Хімічний склад чавуну і бронзи при послідовній заливці такий:

1) чавун 3,2-3,4% С: 2,2-2,4% Si; 0,6-0,8% Mn; 0,18-0,22% P. 0,12% S;

2) бронза: 80% Cu; 3-4% Pb; 3-4% Si, решта 21???

Витримка до заливки другого розплаву 15-25 сек. За зменшеного інтервалу спостерігалось витіснення рідкою бронзою чавуну, оскільки густина бронзи більша за густину чавуну. Збільшений інтервал не забезпечував з'єднання шарів.

1.1.2. Виготовлення біметалевих валків прокатних станів

Відцентрове лиття чавунних біметалевих валків дрібносортних станів гарячої прокатки також проводиться методом послідовної заливки двох шарів металу. Лиття валків з бочкою діаметром до 250-300 мм виконують на машинах роликового типу з горизонтальною віссю обертання. Бочка валка оформляється металевою формою з шаром теплоізоляційного сипучого матеріалу (пісок і цирконове борошно), а цапфи вставними склянками, футерованими сумішшю на рідкому склі. Метал заливають із закритими торцями через ливниковий пристрій, що щільно прилягає до оберткової виливниці (рис. 1.9) так, що форма заповнюється повністю і після затвердіння виливки, внаслідок усадки металу, утворюється осьовий отвір діаметром близько 10% від зовнішнього діаметра бочки. Для зовнішнього

шару бочки валка застосовували легований чавун, а для серцевини і цапф валка - сірий або магнієвий чавун (табл. 1.3).

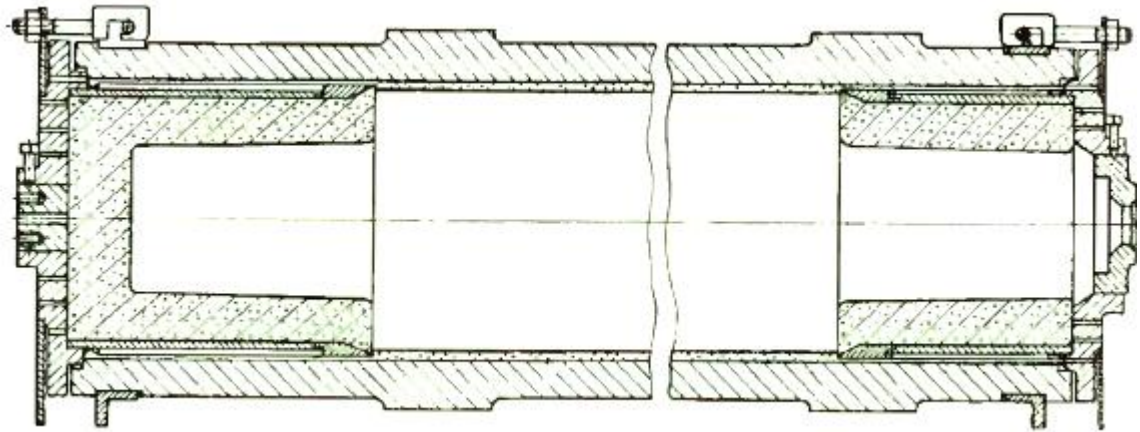


Рис. .1.9. Форма для відцентрового лиття двошарових прокатних валків

Таблиця 1.3

Склад чавуну для валків у %

Шар валка	Чавун	C	Si	Mn	S	P	Cr	Інше
Робочий	Хромонікелевий	3,0-3,2	0,4-0,5	0,5-0,6	До 0,01	До 0,02	0,7-0,8	До 0,3; 1,5-2,2
	Високохромистий	2,8-3,1	0,5-0,6	0,5-0,5	До 0,01	До 0,05	15,0- 17,0	До 1,0
Серцевина	Високопрочний	3,0-3,2	2,3-2,7	0,4	До 0,003	До 0,04	-	0,08
	Сірий	3,4-3,6	1,3-2,4	0,4-0,6	0,05- 0,08	0,10- 0,15	-	-

У табл. 1.4 наведено склад металу валків, отриманих у Японії. Створення надійного стику двох металів визначається співвідношенням температури металів під час заливання, а також тривалістю інтервалу між заливкою робочого шару і серцевини, а також швидкістю заливки другого шару.

Таблиця 1.4

Склад металу зовнішнього та внутрішнього шарів валка у %

Шар	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Зовнішній	1,54	0,48	0,76	0,033	0,024	0,86	0,97	0,38
Внутрішній	3,27	1,4	0,49	0,003	0,029	0,98	0,37	0,12

Для валків з діаметром бочки 255-275 мм у результаті послідовних експериментів були встановлені такі величини зазначених параметрів: швидкість заливки 10-12 кг/сек за температури високохромистого чавуну 1350-1400° С, а хромонікелевого 1300-1350° С. Це забезпечувало щільну структуру і рівномірний відбіл по довжині бочки валка. Температура чавуну серцевини валка була 1250-1280° С і інтервал між заливками робочого шару і серцевини становив 6-7 хв. Менший інтервал призводить до відбілювання серцевини внаслідок розмиву металу робочого шару і переходу хрому в серцевину.

На рис. 1.10 наведено макрошліф перерізу двошарового валка з чітким перехідним шаром без розмиву і без ознак розшарування двох металів. У цьому валку вміст хрому в серцевині в результаті переходу з робочого шару становить не більше 0,4%. Швидкість обертання форми 600 об/хв. Цикл лиття валка діаметром 255-275 мм 60-70 хв. Робочий шар металу по всій довжині бочки має рівномірну товщину, яку можна регулювати ваговим дозуванням металу першого шару.

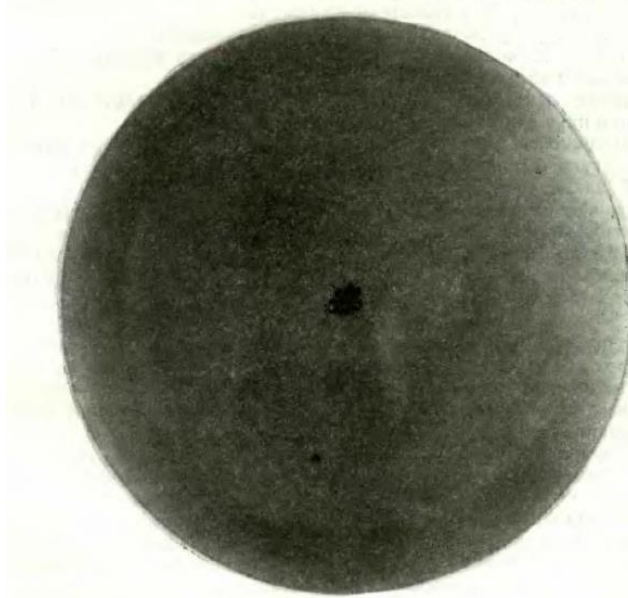


Рис. 1.10. Макроструктура двошарового прокатного валка, відлитого відцентровим способом

Твердість бочки валка по довжині постійна, падіння твердості за перерізом робочого шару з хромонікелевого чавуну незначне, а високохромистого чавуну - взагалі не спостерігається. Мікроструктура робочого шару з хромонікелевого чавуну складається з цементиту і тонкодисперсного перліту; при цьому перехідний шар у відцентровому валку вужчий, ніж у звичайному.

Випробування відцентрових валків у роботі прокатного стану проводили в парі зі звичайними. Зносостійкість відцентрових валків з робочим шаром з хромонікелевого чавуну була на 30% вищою. Характер вироблення калібру рівний номерний, захоплення смуги надійне, без налипання металу.

Техніко-економічна ефективність застосування відцентрово-литих валків визначається зниженням витрати металу на тонну валків з 2,5 до 1,2-1,3, зниженням трудових витрат, збільшенням терміну служби на 25-30% (а в деяких випадках і більше) і підвищенням продуктивності прокатного стану.

1.2. Особливості локального об'ємного легування

Насамперед такий спосіб створення диференційованих властивостей вилівка необхідний для підвищення зносостійкості литих деталей, що піддаються в процесі роботи об'ємному зношуванню

Він заснований на розміщенні в порожнині форми однієї або декількох вставок з легувального матеріалу і розплавленні їх залитим у ливарну форму металом. Вставки під дією теплоти металу розплавляються і в місці їхнього встановлення отримуються леговані обсяги, хімічний склад яких відрізняється від хімічного складу основного сплаву.

Легувальні вставки являють собою пористі брикети з розвиненою поверхнею, що мають отвори і перемички між ними. Легувальні вставки формують у стрижневих ящиках із меленого порошку феросплавів і рідкого скла. У таблиці 1.5. наведено склади таких легувальних вставок.

Таблиця 1.5

Склади вставок для об'ємного легування зносостійких виливків

Тип вставки для	Вміст компонентів, % (мас.)					
	Ферохром	Феромарганець	Феромолібден	Феррованадій	Металева сурма	Рідке скло
Сітчасті	85 - 88	9 - 12	-	-	-	3,0
	83 - 87	-	10 - 14	-	-	3,0
	-	55 - 67	-	30 - 42	30 - 42	3,0
Сотоподібні	88 - 90	-	-	7 - 10	-	2,0
	-	67 - 70	-	-	27 - 30	2,1
	77 - 80	-	17 - 20	-	-	3,0
Суцільні	10 - 16	60 - 65	-	-	17 - 27	2,0
	15 - 20	-	-	15 - 20	65 - 68	2,0
	10 - 18	17 - 24	-	-	56 - 61	2,0

Отримані вставки поміщають у порожнину форми і кріплять там сталевим каркасом зі сталі марки Ст3 з товщиною листа 0,8 - 1,0 мм.

У таблиці 1.6. наведено дані механічних властивостей зносостійких сталей, отриманих з використанням різних способів легування. Еталоном під час випробування на зносостійкість слугує сталь 110Г13Л.

Таблиця 1.6

Механічні властивості високолегованих сталей у виливках

Марка виплавлені ої сталі	Спосіб легування	Механічні властивості сталей у виливках*.			
		Межа міцності при розтягуванні, МПа	Відносне подовження, %	Твердість НВ	Відносна зносостійкість за гідроабразивного зносу, %
130Г14ХМ ФАЛ	Лігатурами та феросплавами в печі	904 - 1001	50 - 54	207	112 - 115
	Феросплавами в печі та мікрохолодильниками в ливарній формі	1245 - 1373	45 - 50	235	126 - 135
	Феросплавами в печі	785 - 830	25 - 27	197	106 - 110
110Г13МЛ	Феросплавами в печі та легуючими вставками у формі	1017 - 1133	23 - 25	241	131 - 137

* Еталонном під час випробування на знос слугувала сталь 110Г13Л, зносостійкість якої умовно прийнято за 100 %.

Термокінетичну сутність процесу локального об'ємного легування сталевих виливків пористими сотоподібними ферохромовими вставками можна пояснити так. На початку контакту легувальної вставки з розплавом навколо вставки утворюється і швидко збільшується за товщиною затверділий шар сталі, товщина якого за 10 с сягає 5-6 мм; ферохром у перемичках, а потім і в товстіших перетинах легувальної вставки послідовно нагрівається, спікається і розплавляється. Під час перетікання ферохрому з верхньої порожнини в нижню, а також під час перебування його в рідкому стані всередині оболонки з твердої сталі він частково розбавляється залізом завдяки розчиненню шару сталі, що контактує з ним, який затвердів. При цьому відбувається збільшення легованої зони виливків на 1 - 2,0 мм по зовнішньому контуру вставки.

Затвердіння легованого об'єму виливки відбувається за температури кристалізації нового легованого сплаву, що утворився. Після затвердіння легованого об'єму по межі контакту легований сплав-сталь відбувається дифузія хрому, вуглецю і заліза, але роль цих процесів за глибиною проникнення і за перерозподілом зазначених елементів незначна.

Легований об'єм за формою повторює конфігурацію стільниковидної легуючої вставки зі збільшенням її розмірів з боку кожної поверхні на 0,8 - 2,0 мм. У легованих об'ємах отримують сплав, який має вміст вуглецю в 2,5 - 3,5 рази, а хрому в 3,5 - 4 рази менший, ніж у матеріалі вставки.

Щільність виливків при використанні локального об'ємного легування вища, ніж при поверхневому легуванні. Леговані, перехідні та нелеговані зони виливки мають чітко виражену структуру для литих сплавів із відповідним хімічним складом. Наприклад, структура у сплаву легованого об'єму з вмістом 12% хрому і 2,1% вуглецю складалася із зерен аустеніту з дрібними включеннями залізохромистих карбідів і карбідної евтектики навколо зерен.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОТРИМАННІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ШАРУ

2.1. Теплопередача через плоску стінку

Теплопередачу через плоску стінку розглянемо на конкретному прикладі. Розглянемо плоску одношарову стінку, товщина якої δ і яка набагато менша за її лінійні розміри (ширину та висоту), тобто передача відбувається по товщині стінки. Стінка з одного боку зазнає дії одного середовища з температурою t_{c1} , а з другого - іншого середовища з температурою t_{c2} . Теплообмін між середовищами і поверхнями стінки відбувається за законом Ньютона - Ріхмана (граничні умови третього роду). Коефіцієнти тепловіддачі між середовищами та поверхнями стінки відповідно дорівнюють α_1 і α_2 (рис. 2.1). Коефіцієнт теплопровідності стінки λ . Необхідно знайти питомий тепловий потік через стінку.

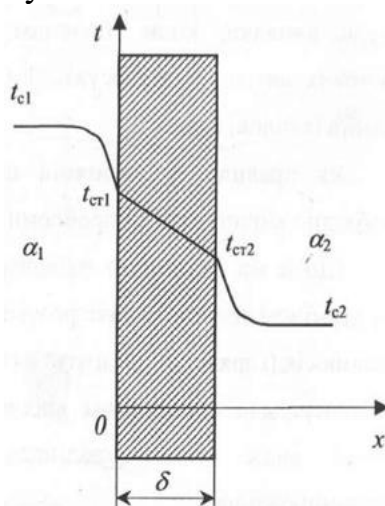


Рис. 2.1. Теплопередача через плоску стінку.

Позначимо невідомі температури на лівій і правій гранях стінки відповідно через t_{cr1} і t_{cr2} . Нехай температура середовища, що прилягає до лівої грані (t_{c1}) буде вищою за температуру з боку правої грані (t_{c2}). Тобто, будемо вважати, що передача тепла через стінку протікає у напрямку зліва направо.

Стосовно конкретної задачі теплопередачу від одного середовища до іншого через стінку, яка їх розділяє, можна розглядати, як процес, що протікає у три стадії.

Перша стадія. Конвективна тепловіддача від середовища з більш високою температурою (t_{c1}) до лівої грані стінки. Тобто кількість тепла, яке конвективно доставляється до поверхні стінки, можна знайти, використовуючи рівняння Ньютона - Ріхмана:

$$q_1 = \alpha_1(t_{c1} - t_{cr1}) . \quad (2.1)$$

Друга стадія. Передача тепла теплопровідністю через стінку товщиною δ . Для знаходження кількості тепла, яке переноситься теплопровідністю, скористуємось рівнянням:

$$q_2 = \frac{\lambda}{\delta} (t_{ct1} - t_{ct2}) . \quad (2.2)$$

Третя стадія. Конвективна тепловіддача від правої грані стінки до другого (холодного) середовища:

$$q_3 = \alpha_2(t_{ct2} - t_{c2}) . \quad (2.3)$$

При стандартній тепловіддачі усі три теплові потоки повинні бути

однаковими і постійними у часі, тобто:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q .$$

З рівнянь (2.2) - (2.3) знаходимо часткові температурні перепади: $(t_{c1} - t_{ct1})$, $(t_{ct1} - t_{ct2})$ і $(t_{ct2} - t_{c2})$. Отже отримаємо:

$$\begin{aligned} t_{c1} - t_{ct1} &= q \frac{1}{\alpha_1} , \\ t_{ct1} - t_{ct2} &= q \frac{\delta}{\lambda} , \\ t_{ct2} - t_{c2} &= q \frac{1}{\alpha_2} . \end{aligned}$$

Знаходимо повний температурний перепад процесу теплопередачі складанням часткових перепадів і вирішенням системи рівнянь відносно теплового потоку. Отож маємо:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} . \quad (2.4)$$

Позначимо $\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = K$. Тоді рівняння (2.3) запишемо у вигляді:

$$q = K(t_{c1} - t_{c2}) . \quad (2.5)$$

Вираз (2.5) називається рівнянням теплопередачі через плоску стінку.

У рівнянні (2.5) коефіцієнт пропорційності K називається коефіцієнтом теплопередачі. Він має розмірність $Вт/м^2 \cdot К$, а його фізичне тлумачення буде зрозумілим, якщо у рівнянні (2.5) прийняти $t_{c1} - t_{c2} = 1^\circ C$.

Тоді отримаємо тотожність: $q = K$.

Тобто, коефіцієнт теплопередачі представляє собою кількість теплоти, що передається від одного середовища до іншого за одиницю часу через одиницю ізотермічної поверхні при різниці температур між середовищами, рівній $1^\circ C$.

Величина, зворотна коефіцієнту теплопередачі $1/K$, називається повним термічним опором теплопередачі ($R_{пов}$).

$$\frac{1}{K} = R_{пов} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = R_1 + R_2 + R_3 . \quad (2.6)$$

У рівнянні $R_1 = \frac{1}{\alpha_1}$, $R_2 = \frac{\delta}{\lambda}$ і $R_3 = \frac{1}{\alpha_2}$ називаються частковими опорами тепловіддачі (R_1 і R_3) і теплопровідності стінки (R_2).

Температурне поле при теплопередачі через одношарову стінку представлено на рис. 2.1.

Якщо виконати аналогічні математичні операції та записати вираз (2.7) як

$$q = \frac{t_{ct1} - t_{cti+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

то отримаємо рівняння теплопередачі через плоску стінку, яка складається із n шарів:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт теплопередачі через багат шарову плоску стінку становить:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.9)$$

Визначивши кількість тепла, що передається від одного теплоносія до іншого (рівняння 2.4), можна знайти значення температур на поверхнях стінки:

$$t_{ct1} = t_{c1} - q \frac{1}{\alpha_1}, \quad (2.10)$$

$$t_{ct2} = t_{c2} + q \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2.11)$$

[7]

2.2 Температурне поле основи виливка

Розрахунок температурного поля пластинки розглянемо на прикладі конкретної задачі. Дана пластинки кінцевих розмірів δ_1 , δ_2 , δ_3 з відомим початковим розподілом температури $f(x, y, z)$. У початковий момент часу одна з поверхонь пластини піддається впливу гарячого середовища з температурою t_r , яке може змінюватися в часі, дві поверхні охолоджуються середовищами різної температури t_b і $t_{b,T}$, а решта поверхонь теплоізолювані (рис. 2.2).

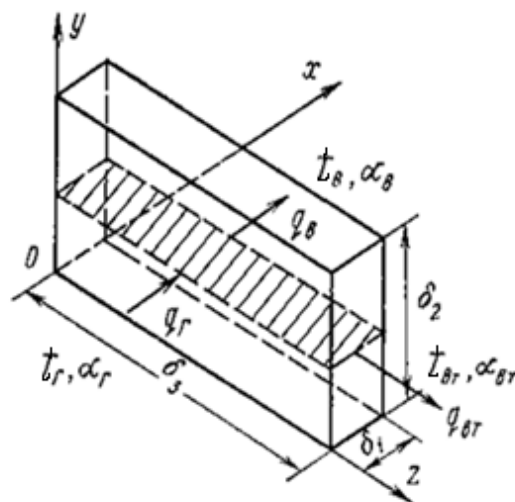


Рис. 2.2. Теплообмін пластини кінцевих розмірів.

При цьому $t_r > t_b$, $t_r > t_{b,T}$ і $t_b \neq t_{b,T}$. Теплообмін пластини із середовищами відбувається згідно граничним умовам третього роду. Коефіцієнти тепловіддачі поверхонь пластини із середовищами відповідно рівні α_r , α_b , $\alpha_{b,T}$.

В процесі теплообміну вони можуть змінюватися в часі. Початок прямокутної системи координат розмістимо в кутку пластини. З метою простоти викладу і виду розрахункових залежностей розглянемо лінійне рівняння теплопровідності.

Система рівнянь процесу теплопередачі пластини кінцевих розмірів при прийнятій фізичній моделі має вигляд:

$$\text{при } \tau > 0; 0 < x < \delta_1, 0 < y < \delta_2, 0 < z < \delta_3$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left[\frac{\partial^2 t(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t(x,y,z,\tau)}{\partial z^2} \right]; \quad (2.12)$$

$$\text{при } \tau = 0 \quad t(x,y,z,0) = f(x,y,z); \quad (2.12a)$$

$$\text{при } x = 0 \quad \lambda \frac{\partial t(0,y,z,\tau)}{\partial x} + \alpha_\Gamma [t_\Gamma - t(0,y,z,\tau)] = 0; \quad (2.13)$$

$$\text{при } x = \delta_1 \quad \lambda \frac{\partial t(\delta_1,y,z,\tau)}{\partial x} - \alpha_B [t_B - t(\delta_1,y,z,\tau)] = 0; \quad (2.14)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } y = 0 \quad \frac{\partial t(x,0,z,\tau)}{\partial y} = 0 \\ \text{при } y = \delta_2 \quad \frac{\partial t(x,\delta_2,z,\tau)}{\partial y} = 0 \\ \text{при } z = 0 \quad \frac{\partial t(x,y,0,\tau)}{\partial z} = 0 \end{array} \right\} \quad (2.15)$$

$$\text{при } z = \delta_3 \quad \lambda \frac{\partial t(x,y,\delta_3,\tau)}{\partial z} - \alpha_{B,T} [t_{B,T} - t(x,y,\delta_3,\tau)] = 0. \quad (2.16)$$

Вивід розрахункової залежності. Для отримання розрахункової формули необхідно замінити диференційне рівняння теплопровідності (2.2) відповідним рівнянням в кінцевих різницях. З цією метою в пластині будемо просторову прямокутну сітку поруч площин, паралельних координатним площинам і віддаленим один від одного відповідно на Δx , Δy і Δz (рис. 2.3). Точки сітки нумеруємо.

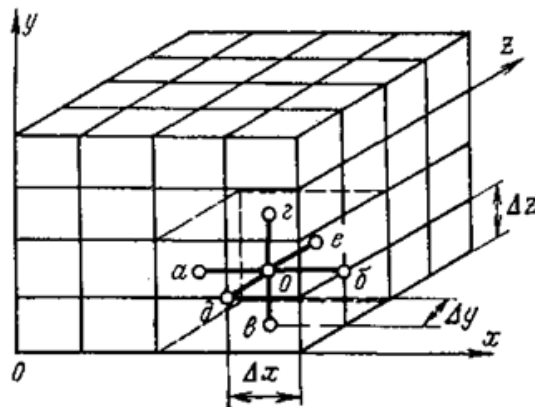


Рис. 2.3. Схема просторової сітки.

З усієї сіткової області виділимо всередині неї одну просторову клітинку, вузлові точки якої позначимо через 0, а, б, в, г, д, е. Значення температур в зазначених точках запишемо у вигляді:

$t_{i,n,m,k}$ - значення температури в точці 0 з координатами (x_i, y_n, z_m) в момент часу τ_k ;

$t_{i-1,n,m,k}$ - значення температури в точці а з координатами (x_{i-1}, y_n, z_m) в момент часу τ_k ;

$t_{i+1,n,m,k}$ - значення температури в точці б з координатами (x_{i+1}, y_n, z_m) в момент часу τ_k ;

$t_{i,n-1,m,k}$ - значення температури в точці в з координатами (x_i, y_{n-1}, z_m) в момент часу τ_k ;

$t_{i,n+1,m,k}$ - значення температури в точці г з координатами (x_i, y_{n+1}, z_m) в момент часу τ_k ;

$t_{i,n,m-1,k}$ - значення температури в точці д з координатами (x_i, y_n, z_{m-1}) в момент часу τ_k ;

$t_{i,n,m+1,k}$ - значення температури в точці е з координатами (x_i, y_n, z_{m+1}) в момент часу τ_k .

Через $t_{i,n,m,k}$ позначимо значення температури в точці 0 в момент часу τ_k , а через $t_{i,n,m,k+1}$ - значення температури в тій же точці в момент часу $\tau_{k+1} = \tau_k + \Delta\tau$. Значення температури в точці 0 буде визначатися значенням її в точках а і б, в і г, д і е. Отже, щоб вирішити завдання по визначенню значень температури в будь-якій точці сітки, необхідно мати розрахункові формули, які встановлюють зв'язок між сусідніми значеннями функції.

Нехай шукану функцію температури $t(x, y, z, \tau)$ в будь-якій точці пластини представимо формулою Тейлора для функції чотирьох незалежних змінних:

$$t_{i+1,n+1,m+1,k+1} = t_{i,n,m,k} + \frac{1}{1!} \left(\frac{\partial}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial}{\partial \tau} \Delta \tau \right) t_{i,n,m,k} + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial}{\partial \tau} \Delta \tau \right)^2 t_{i,n,m,k} + \dots + \varepsilon_l \quad (2.17)$$

де залишковий член

$$\varepsilon_l = \frac{1}{(l+1)!} \left(\frac{\partial}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial}{\partial \tau} \Delta \tau \right)^{l+1} t(x_i + \beta_1 \Delta x; y_n + \beta_2 \Delta y; z_m + \beta_3 \Delta z; \tau_k + \beta_4 \Delta \tau) \quad (2.18)$$

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots; 0 < \beta_1 < 1; 0 < \beta_2 < 1; 0 < \beta_3 < 1; 0 < \beta_4 < 1.$$

Будемо вважати, що кроки інтегрування Δx , Δy , Δz і $\Delta \tau$ обрані настільки малими, що можна знехтувати членами, що містять Δx , Δy , Δz в третьому ступені, а $\Delta \tau$ - у другому ступені. Користуючись формулою Тейлора, напишемо вираз функцій для точок б, г, е і а, в, д. Зі співвідношення (2.17) для точок б, г, е, а, в, д, 0 відповідно отримаємо:

$$t_{i+1,n,m,k} = t_{i,n,m,k} + \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial x^2} \Delta x^2 + \varepsilon_{l1}; \quad (a)$$

$$t_{i,n+1,m,k} = t_{i,n,m,k} + \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial y^2} \Delta y^2 + \varepsilon_{l2}; \quad (б)$$

$$t_{i,n,m+1,k} = t_{i,n,m,k} + \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial z} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial z^2} \Delta z^2 + \varepsilon_{l3}; \quad (в)$$

$$t_{i-1,n,m,k} = t_{i,n,m,k} - \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial x^2} \Delta x^2 + \varepsilon_{l4}; \quad (г)$$

$$t_{i,n-1,m,k} = t_{i,n,m,k} - \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial y^2} \Delta y^2 + \varepsilon_{l5}; \quad (д)$$

$$t_{i,n,m-1,k} = t_{i,n,m,k} - \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial z} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial z^2} \Delta z^2 + \varepsilon_{l6}; \quad (е)$$

$$t_{i,n,m,k+1} = t_{i,n,m,k} + \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial \tau} \Delta \tau + \varepsilon_{l7}. \quad (ж)$$

Оскільки вище ми вибрали, що Δx , Δy , Δz і $\Delta \tau$ обрані малими, то залишкові члени ε_{l1} , ε_{l2} ... ε_{l7} будуть прагнути до нуля. Нехтуючи зазначеними величинами і складаючи почленно рівності (а) і (г), (б) і (д), (в) і (е), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_{i,n,m,k}}{\partial \tau} &= \frac{t_{i,n,m,k+1} - t_{i,n,m,k}}{\Delta \tau}, \\ \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial x^2} &= \frac{t_{i-1,n,m,k} - 2t_{i,n,m,k} + t_{i+1,n,m,k}}{\Delta x^2}, \\ \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial y^2} &= \frac{t_{i,n-1,m,k} - 2t_{i,n,m,k} + t_{i,n+1,m,k}}{\Delta y^2}, \\ \frac{\partial^2 t_{i,n,m,k}}{\partial z^2} &= \frac{t_{i,n,m-1,k} - 2t_{i,n,m,k} + t_{i,n,m+1,k}}{\Delta z^2}. \end{aligned} \right\} (2.19)$$

Підставивши рівності (2.19) замість відповідних величин у рівняння (2.13), після простих перетворень отримаємо:

$$t_{i,n,m,k+1} = [1 - 2(\Delta F_{O_x} + \Delta F_{O_y} + \Delta F_{O_z})]t_{i,n,m,k} + \Delta F_{O_x}(t_{i-1,n,m,k} + t_{i+1,n,m,k}) + \Delta F_{O_y}(t_{i,n-1,m,k} + t_{i,n+1,m,k}) + \Delta F_{O_z}(t_{i,n,m-1,k} + t_{i,n,m+1,k}), \quad (2.20)$$

де

$$\Delta F_{O_x} = \frac{a\Delta \tau}{\Delta x^2}; \quad \Delta F_{O_y} = \frac{a\Delta \tau}{\Delta y^2}; \quad \Delta F_{O_z} = \frac{a\Delta \tau}{\Delta z^2}.$$

Залежність (2.20) є основною розрахунковою формулою при визначенні температури в пластині.

Знаючи значення температур в точках сітки 0, а, б, в, г, д, е в момент часу τ_k і користуючись виразом (2.20), знаходимо значення температури в точці 0 в наступний момент часу τ_{k+1} . Обчислюючи крок за кроком значення температури в різних точках сітки за формулою (2.20), знаходимо шукане поле температур у всіх внутрішніх точках, якщо відомо початковий розподіл температур і спосіб визначення температур в граничних точках сітки, тобто в точках, що лежать на поверхнях пластини.

Як впливає з висновку розрахункової формули (2.20), перехід від точного значення функції t до її наближеного значення буде справедливий, якщо кроки інтегрування обрані за співвідношенням

$$0 \leq [1 - 2(\Delta F_{O_x} + \Delta F_{O_y} + \Delta F_{O_z})] \leq 1. \quad (2.21)$$

Аналіз розрахункової залежності. Залежність (2.20) є рішенням рівняння теплопровідності для випадку прямокутної системи координат із застосуванням прямокутної просторової сітки в загальному вигляді. З виразу (2.20) випливає, що коефіцієнт при першому члені правої частини враховує сумарний вплив температур сусідніх точок на температуру в точці 0, тобто перший член правої частини дає значення температури в точці 0 в момент часу τ з урахуванням впливу температури в довколишніх точках, другий, третій і четвертий члени правої частини враховують відповідно поширення тепла уздовж координатних осей x , y і z , коефіцієнти ΔF_{O_x} , ΔF_{O_y} , ΔF_{O_z} показують ступінь впливу поширення тепла у відповідному напрямку на температуру в точці 0. Чим менше крок інтегрування Δx , Δy , Δz тим ближче вибрані визначаючі точки до точки 0, тим більший вплив вони роблять на температуру в точці 0 і тим точніше сам розрахунок. Залежність (2.20)

дозволяє визначити значення температури в будь-якій точці пластини в довільний момент часу, за винятком точок, що лежать на її поверхнях. Якщо крок інтегрування за часом $\Delta\tau$ вибрати довільним, а кроки Δx , Δy , Δz так, щоб $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, то рівність (2.20) спрощується і приймає вигляд:

$$t_{i,n,m,k+1} = (1 - 6\Delta F o_x) t_{i,n,m,k} + \Delta F o_x (t_{i-1,n,m,k} + t_{i+1,n,m,k} + t_{i,n-1,m,k} + t_{i,n+1,m,k} + t_{i,n,m-1,k} + t_{i,n,m+1,k}). \quad (2.22)$$

Якщо кроки інтегрування за координатами вибрати так, щоб $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, а крок за часом вибрати по співвідношенню $\Delta\tau = \frac{\Delta x^2}{6a}$, то останній вираз також спрощується:

$$t_{i,n,m,k+1} = \frac{1}{6} (t_{i-1,n,m,k} + t_{i+1,n,m,k} + t_{i,n-1,m,k} + t_{i,n+1,m,k} + t_{i,n,m-1,k} + t_{i,n,m+1,k}). \quad (2.22)$$

Якщо градієнт температури в одному з напрямків координатних осей (наприклад, вісь y) малий, то його вплив на температурне поле буде також мале. Вважаючи, що тепловий потік в напрямку осі y відсутній, для двовимірного температурного поля з рівності (2.20) маємо:

$$t_{i,m,k+1} = [1 - 2(\Delta F o_x + \Delta F o_z)] t_{i,m,k} + \Delta F o_x (t_{i-1,m,k} + t_{i+1,m,k}) + \Delta F o_z (t_{i,m-1,k} + t_{i,m+1,k}). \quad (2.23)$$

У разі двовимірного потоку тепла можна відзначити два характерних варіанти. Якщо кроки інтегрування вибрані так, що $\Delta x = \Delta z$, то з рівності (2.23) маємо:

$$t_{i,m,k+1} = (1 - 4\Delta F o_x) t_{i,m,k} + \Delta F o_x (t_{i-1,m,k} + t_{i+1,m,k} + t_{i,m-1,k} + t_{i,m+1,k}). \quad (2.24)$$

Якщо крок інтегрування $\Delta x = \Delta z$, а $\Delta\tau = \frac{\Delta x^2}{4a}$, то з виразу (2.24) отримаємо:

$$t_{i,m,k+1} = \frac{1}{4} (t_{i-1,m,k} + t_{i+1,m,k} + t_{i,m-1,k} + t_{i,m+1,k}). \quad (2.25)$$

Отримані розрахункові залежності (2.23) - (2.25) є простими та зручними для розрахунків. Розрахункова схема для залежностей (2.22), (2.24) показана на рис. 2.4, а для залежності (2.23) - на рис. 2.5.

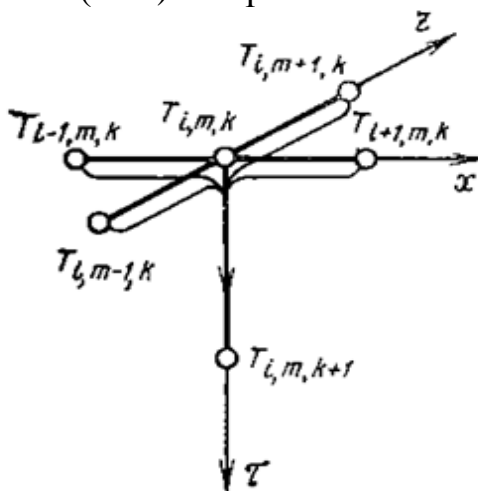


Рис. 2.4. Схема розрахунку температури по залежності (2.23) і (2.24).

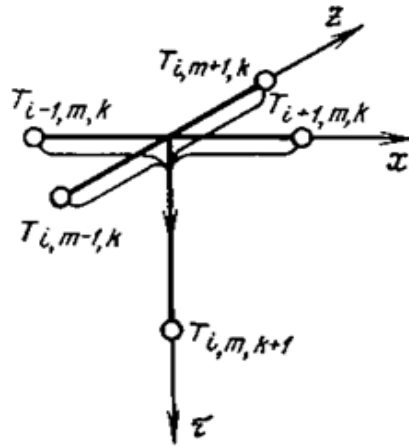


Рис. 2.5. Схема розрахунку температури по залежності (2.25).

Якщо теплові потоки в напрямку координатних осей y і z малі і ними можна знехтувати, то в цьому випадку має місце одномірне температурне поле. Для одномірної задачі з рівняння (2.20) отримаємо таку розрахункову залежність:

$$t_{i,k+1} = (1 - 2\Delta F o_x) t_{i,k} + \Delta F o_x (t_{i-1,k} + t_{i+1,k}). \quad (2.26)$$

Розглянемо можливі варіанти спрощення розрахункової залежності (2.94). Якщо при довільному виборі Δx крок інтегрування за часом визначати за співвідношенням $\Delta \tau = \frac{\Delta x^2}{6a}$, то з рівності (2.26) випливає:

$$t_{i,k+1} = \frac{1}{6} (t_{i-1,k} + 4t_{i,k} + t_{i+1,k}). \quad (2.27)$$

Похибка для формули (2.27) становить $O(\Delta x^4)$. Якщо крок інтегрування Δx вибрати довільно, а $\Delta \tau$ - за співвідношенням $\Delta \tau = \frac{\Delta x^2}{2a}$, то з рівності (2.26) маємо:

$$t_{i,k+1} = \frac{1}{2} (t_{i-1,k} + 4t_{i,k} + t_{i+1,k}). \quad (2.28)$$

Похибка в рішенні також становить $O(\Delta x^4)$. Розрахункова схема для залежностей (2.26), (2.27) показана на рис. 2.6, а для залежності (2.28) на рис. 2.12.

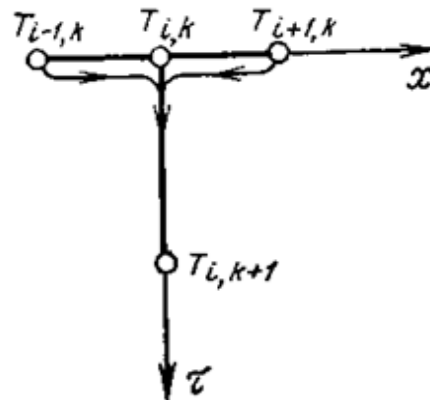


Рис. 2.6. Схема розрахунку температури по залежності (2.26) і (2.27).

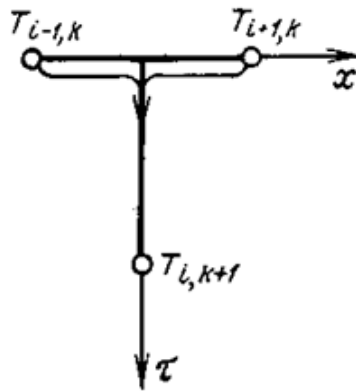


Рис. 2.7. Схема розрахунку температури по залежності (2.28).

Визначення температури поверхонь пластини. Розрахункові залежності (2.20) - (2.28) дозволяють визначати значення температури у всіх внутрішніх точках пластини. Для визначення температурного поля необхідно мати також розрахункові залежності для визначення температури на поверхнях пластини. Вихідними залежностями для визначення температури на поверхнях пластини є граничні умови (2.13), (2.14), (2.16). Отримання розрахункової формули покажемо на прикладі залежності (2.13). Граничні умови (2.13) запишемо у вигляді

$$\lambda \frac{\partial t_{\text{п}}}{\partial x} + \alpha_{\text{г}}(t_{\text{г}} - t_{\text{п}}) = 0. \quad (2.29)$$

Будемо вважати, що у поверхні пластини задана нормальна різниця Δt між значенням температури на поверхні $t_{\text{п}}$ та її значенням у найближчій точці контуру (сітки) t_1 , тобто:

$$\Delta t = t_{\text{п}} - t_1.$$

З іншого боку, значення нормальної різниці можна визначити з співвідношення

$$\Delta t = -\frac{\partial t_{\text{п}}}{\partial x} \Delta x.$$

Знак мінус береться тому, що при поширенні потоку тепла в напрямку осі x градієнт температури спрямований у зворотний бік. З порівняння двох останніх рівностей отримаємо:

$$\frac{\partial t_{\text{п}}}{\partial x} = \frac{t_{\text{п}} - t_1}{\Delta x}. \quad (2.30)$$

Підставляючи рівність (2.30) в рівняння (2.29) і вводячи індекс часу k , знайдемо шукану температуру поверхні пластини:

$$t_{\text{п},k} = \frac{\left(1 + \frac{c_0}{\alpha_{\text{г},k}} t_{1,k}\right)}{1 + \frac{c_0}{\alpha_{\text{г},k}}} t_{\text{г},k}, \quad (2.31)$$

де $c_0 = \frac{\lambda}{\Delta x}$.

Використовуючи граничні умови (2.14) і (2.16), аналогічним шляхом отримуємо розрахункові залежності для визначення температури інших поверхонь пластини (див. рис. 2.7):

$$t_{\text{н.п},k} = \frac{1 - \frac{c_0}{\alpha_{\text{в},k}} t_{2,k}}{1 - \frac{c_0}{\alpha_{\text{в},k}}} t_{\text{в},k}, \quad (2.32)$$

$$t_{п.т,k} = \frac{1 - \frac{c''_0 t_{3,k}}{\alpha_{в.т,k} t_{в.т,k}}}{1 - \frac{c''_0}{\alpha_{в.т,k}}} t_{в.т,k} \cdot \quad (2.33)$$

тут $c''_0 = \frac{\lambda}{\Delta z}$; $t_{2,k}$ і $t_{3,k}$ - температури в точках сітки, найближчих до відповідних поверхонь пластини, в момент часу τ_k .

Розрахункові формули (2.31) - (2.33) дають можливість визначати температуру на поверхнях пластини за значеннями її в сусідніх точках і по температурі навколишнього середовища для однойменних моментів часу.

Розрахунковий бланк і порядок виконання розрахунку. Сукупність розрахункових залежностей (2.20) - (2.28) і (2.31) - (2.33) дозволяє визначити температуру в будь-якій точці пластини, включаючи і поверхні, в будь-який момент часу. Розрахункова схема і розрахунок значно спрощуються, якщо користуватися не загальною розрахунковою формулою (2.20), а приватними залежностями виду (2.26). Форма розрахункового бланка і порядок розрахунку

показані на рис. 2.8.

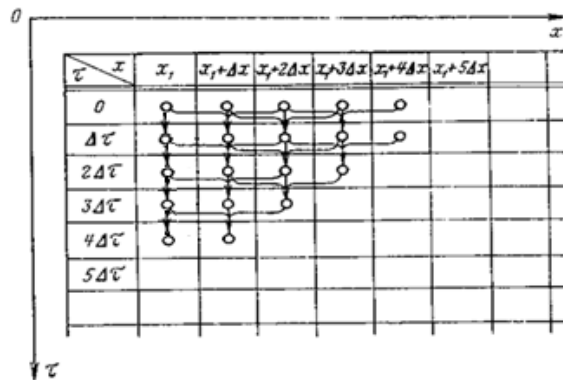


Рис. 2.8. Розрахунковий бланк для одношарової плоскої стінки.

Для користування розрахунковим бланком необхідно мати допоміжну таблицю або графік значень $t_r(\tau)$, $t_b(\tau)$, $t_{в.т}(\tau)$ і $\alpha_r(\tau)$, $\alpha_b(\tau)$, $\alpha_{в.т}(\tau)$. Якщо всі або частина із зазначених величин будуть постійні, то це значно спрощує проведення розрахунку [8].

2.3 Методика розрахунку зміни температурного поля пластинки і температури середовища із зміною часу

Припустимо, що необхідно отримати на поверхні виливки функціональний шар із заданим хімічним складом, наприклад методом СВС. Розглянемо основу виливка на прикладі пластинки, на частині якої треба отримати цей шар. Для цього ми на пластинці закріплюємо трубу, яку ми футеруємо. В отриману форму засипаємо першим більшим шаром суміш із терміту, кріоліту і шихти (металічної основи), а другим меншим шаром засипаємо тільки термічну суміш. Схема форми представлена рис. 2.9.

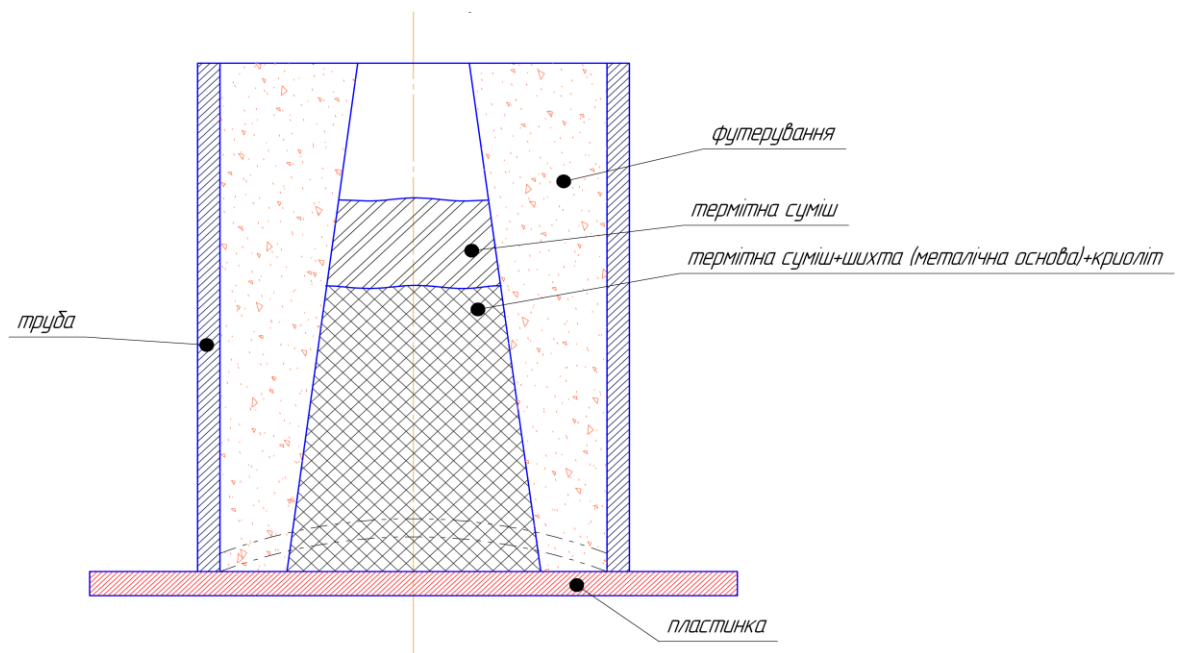


Рис. 2.9. Схема форми для отримання на пластинці наплавлення методом СВС.

В результаті підпалу термічної суміші відбувається процес горіння термічної суміші при високих температурах ($2861\text{ }^{\circ}\text{C}$) [10], що призводить до плавлення металічної основи. Процес горіння і наплавлення відбувається дуже швидко, за декілька секунд. В результаті чого отримуємо наплавлення із заданим хімічним складом на пластинці. Для прискорення процесу і кращого наплавлення форму прогрівають.

Нам необхідно розрахувати температурне поле самої пластинки, як змінюється температура рідкого металу із часом, чи приплавиться наплавляємий шар на поверхню пластинки. Для цього скористаємося теорією і формулами теплопровідності і теплопередачі для нестационарного процесу, так як в нас змінюється як температура середовища (рідкого металу), так і температура пластинки із часом. Так як для поставленої задачі ці розрахунки дуже складні, то для їх спрощення представимо, що весь рідкий метал одразу ж надійшов до пластинки і мав температуру $2861\text{ }^{\circ}\text{C}$ по всій її площині, а розрахунок будемо вести для ідеальної моделі, тобто тільки для пластинки, будемо вважати, що тепловіддачею форми (труби і футерування) можна знехтувати. Представимо, що модель процесу буде така: через необмежену пластинку товщиною 5 мм , буде відбуватися тепловіддача тепла по всій її площі, одна частина якої буде знаходитися в середовищі рідкого металу, а інша в середовищі повітря. Необхідно розрахувати температурне поле пластинки і температуру середовища, яке змінюється з часом. Для цього скористаємося методом чисельного інтегрування для розрахунку температурного поля пластинки і формулами теплопередачі для плоскої стінки. Так як процес горіння і наплавлення відбувається дуже швидко, то розрахунок будемо вести представивши, що за 1 с температура середовища (рідкого металу) не змінюється. І для кожної секунди будемо розраховувати

як температурне поле самої пластинки, так і температуру середовища (рідкого металу). Отже, приступимо до розрахунків.

2.3.1 Постановка задачі

Дана необмежена пластинка товщиною 5 мм, одна частина якої поміщена в середовище з температурою 2861 °С, а інша частина якої знаходиться на повітрі із заданою температурою. Пластинка вироблена зі сталі марки ст. 40. Розрахувати температурне поле пластинки і температуру середовища в залежності від температури прогріву повітря і пластинки із зміною часу, використовуючи значення теплопровідності і температуропровідності пластинки від температури, які представлені в таблицях 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1

Значення коефіцієнту теплопровідності сталі 40 від температури [11]

Температура, °С	100	200	300	400	500	600 і вище
Одиниці виміру						
кал/(см·сек·град)	0,180	0,154	0,125	0,105	0,091	0,07
Вт/(м·К)	75,4	64,5	52,3	44	38,1	29,3

Таблиця 2.2

Значення коефіцієнту температуропровідності сталі 40 від температури [12]

Температура, °С	Температуропровідність, м ² /с
50 - 100	13,3·10 ⁻⁶
100 - 150	12,8·10 ⁻⁶
150 - 200	12,2·10 ⁻⁶
200 - 250	11,4·10 ⁻⁶
250 - 300	10,8·10 ⁻⁶
300 - 350	10,3·10 ⁻⁶
350 - 400	9,44·10 ⁻⁶
400 - 450	8,61·10 ⁻⁶
450 - 500	7,78·10 ⁻⁶
500 - 550	6,94·10 ⁻⁶
550 - 600	6,39·10 ⁻⁶
600 - 650	5,83·10 ⁻⁶
650 - 700	5,28·10 ⁻⁶
700 - 750	2,50·10 ⁻⁶
750 - 800	5,56·10 ⁻⁶
800 - 850	5,00·10 ⁻⁶
850 - 900	5,28·10 ⁻⁶
900 - 950	5,28·10 ⁻⁶
950 - 1000	5,56·10 ⁻⁶
1000 - 1050	5,56·10 ⁻⁶
1050 – 1100 і вище	5,83·10 ⁻⁶

2.3.2 Алгоритм розрахунку

Розрахунок температурного поля будемо проводити методом чисельного інтегрування [8].

Почнемо розрахунок з розрахунку температурного поля пластинки. Для цього виберемо шаги інтегрування Δx і $\Delta \tau$, які повинні задовольнятися умові (2.21):

$$0 \leq [1 - 2(\Delta F_{O_x} + \Delta F_{O_y} + \Delta F_{O_z})] \leq 1.$$

Яка у нашому випадку для одновірної передачі тепла (по вісі x із рис. 2.7) приймає вигляд:

$$0 \leq \beta \leq 1,$$

де $\beta = 1 - 2\Delta F_{O_x} = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$, тобто

$$0 \leq [1 - 2\Delta F_{O_x}] \leq 1. \quad (2.34)$$

Якщо умови (2.34) задовольняються, то продовжуємо розрахунок для першої секунду, якщо ні, то змінюємо Δx і $\Delta \tau$ до тих пір, поки ці умови не будуть задоволені.

Далі розраховуємо температуру всередині пластинки і на її поверхні для кожного моменту часу за допомогою формул (2.26), (2.31) і (2.32), які у нашому випадку матимуть вигляд:

$$t_{i,k+1} = \left(1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}\right) t_{i,k} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} (t_{i-1,k} + t_{i+1,k}); \quad (2.35)$$

$$t_{п,k} = \frac{\left(1 + \frac{c_0 t_{1,k}}{\alpha_{с,k} t_{с,k}}\right)}{1 + \frac{c_0}{\alpha_{с,k}}} t_{с,k}; \quad (2.36)$$

$$t_{н.п,k} = \frac{1 - \frac{c_0 t_{2,k}}{\alpha_{в,k} t_{в,k}}}{1 - \frac{c_0}{\alpha_{в,k}}} t_{в,k}.$$

де $c_0 = \frac{\lambda}{\Delta x}$, а $t_{1,k}$ і $t_{2,k}$ - температури в точках сітки, найближчих до відповідних поверхонь пластини. Результати розрахунку оформлюємо у вигляді рис. 2.10.

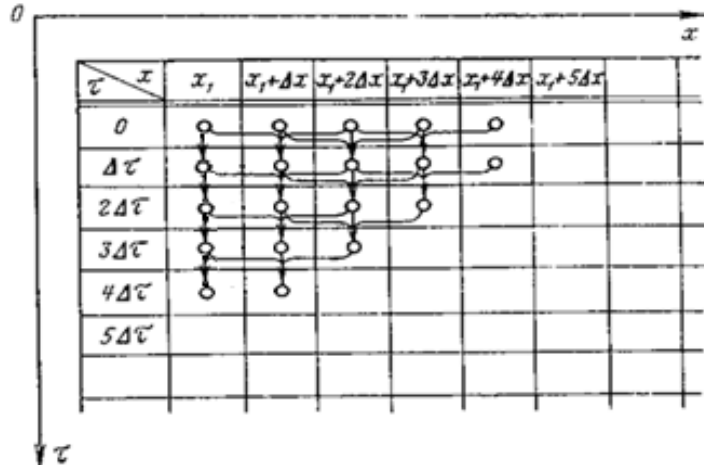


Рис. 2.10. Розрахунковий бланк для одношарової плоскої стінки.

Тобто для кожного наступного розрахунку температури за момент часу, вихідними даними до нього є попередні результати за попередній момент часу. За цією схемою знаходимо температуру на поверхнях пластини і всередині пластини за 1 секунду.

Температуру пластинки на першу секунду знаходимо як середнє арифметичне температур поверхонь пластини і температур всередині пластинки.

Отже, знайшовши температуру пластинки змінюємо умови задачі, такі як температура середовища, температура пластинки, коефіцієнт тепловіддачі, температуропровідності і теплопровідності, для розрахунку температурного поля на другу секунду, вихідними температурами для розрахунку якого будуть температури точок пластинки за першу секунду. Температуру середовища знайдемо підставляючи формулу (2.4) в (2.9) для нашого випадку і виконавши алгебраїчні дії і перетворення, отримаємо формулу для розрахунку температури середовища в залежності від температури поверхні пластинки:

$$t_c = \frac{t_n(\lambda\alpha_B + \delta\alpha_c\alpha_B + \alpha_c\lambda) - t_B\lambda\alpha_B}{\delta\alpha_c\alpha_B + \alpha_c\lambda}, \quad (2.37)$$

де t_c – температура середовища, °С;

t_n – температура поверхні пластинки на кінець моменту часу (для першої

секунди – на кінець першої секунди), °С;

λ – коефіцієнт теплопровідності пластинки, Вт/(м·К);

δ – товщина пластинки, м;

α_B – коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря, Вт/(м²·К);

α_c – коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки, Вт/(м²·К).

Даними для розрахунку температури середовища будуть дані для розрахунку на наступний момент часу. Наприклад, для другої секунди – коефіцієнти теплопровідності, температуропровідності і тепловіддачі беремо з даних другої секунди, які змінюються в залежності від температури пластинки.

Отже, для розрахунку температур поверхонь і внутрішніх точок пластинки за другу секунду вихідними даними будуть температури поверхонь і внутрішніх точок пластинки за першу секунду. Аналогічно для третьої секунди розраховуємо температуру середовища для третьої секунди і температуру пластинки для третьої секунди.

Аналогічні розрахунки проводимо і для наступних секунд, змінюючи умови задачі для наступних секунд беручи вихідні дані із попередніх секунд. Розрахунки ведемо доти, доки температури поверхні пластинки не досягне температури плавлення сталі 1539 °С, а температура середовища не опуститься до температури плавлення сталі 1539 °С. І в точці, в якій зустрінуться ці дві температури з температурою плавлення сталі одночасно, і буде точкою в якій до поверхні пластинки приплавиться наплавляємий шар. Якщо цього не відбудеться, значить наплавляє мий шар не приплавиться.

3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ ВЗАЄМОДІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ОТРИМАННІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ШАРУ ВИЛИВКА ІЗ ТЕРМІТНОГО РОЗПЛАВУ

Розраховувати почнемо без прогрівання із температурою повітря і пластинки 20 °С. Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Вихідні дані для розрахунку за першу секунду без прогрівання при 20 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	2861
Температура повітря t_b , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	20
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	2500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	75,4
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,0000133
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,335
$c_0 = \lambda/\Delta x$	377000

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

За допомогою формул (2.35), (2.36), (2.32) розраховуємо температури в точках пластинки.

Для 0,01 с:

$$t_{п 0,01} = \frac{\left(1 + \frac{377000 \cdot 20}{2500 \cdot 2861}\right)}{1 + \frac{377000}{2500}} 2861 = 39 \text{ °С};$$

$$t_{0,1 0,01} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (20 + 20) = 20 \text{ °С};$$

$$t_{0,2 0,01} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (20 + 20) = 20 \text{ °С};$$

$$t_{0,3 0,01} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (20 + 20) = 20 \text{ °С};$$

$$t_{0,4 0,01} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (20 + 20) = 20 \text{ °С};$$

$$t_{н.п 0,01} = \frac{1 - \frac{377000 \cdot 20}{35 \cdot 20}}{1 - \frac{377000}{35}} 20 = 20 \text{ °С}.$$

Для 0,02 с:

$$t_{п 0,01} = \frac{\left(1 + \frac{377000 \cdot 39}{2500 \cdot 2861}\right)}{1 + \frac{377000}{2500}} 2861 = 57 \text{ °С};$$

$$t_{0,1 \ 0,02} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (39 + 20) = 26 \text{ }^\circ\text{C} ;$$

$$t_{0,2 \ 0,01} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (20 + 20) = 20 \text{ }^\circ\text{C} ;$$

$$t_{0,3 \ 0,01} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (20 + 20) = 20 \text{ }^\circ\text{C} ;$$

$$t_{0,4 \ 0,01} = \left(1 - \frac{2 \cdot 0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2}\right) \cdot 20 + \frac{0,0000133 \cdot 0,001}{0,0002^2} (20 + 20) = 20 \text{ }^\circ\text{C} ;$$

$$t_{н.п \ 0,01} = \frac{1 - \frac{377000 \cdot 20}{35}}{1 - \frac{377000}{35}} 20 = 20 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Аналогічні розрахунки проводимо і для наступних моментів часу. Результати розрахунку температурного поля для першої секунди без прогрівання при 20 °С представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахунок температурного поля для першої секунди без прогрівання при 20 °С

τ, с	Координата x, см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	20	20	20	20	20	20
0,01	39	20	20	20	20	20
0,02	57	26	20	20	20	20
0,03	76	34	22	20	20	20
0,04	94	44	26	21	20	20
0,05	112	55	30	22	20	20
0,06	130	66	36	24	21	21
0,07	148	77	42	27	22	22
0,08	166	89	49	30	24	24
0,09	184	101	56	34	26	26
0,1	202	114	64	39	29	29
0,11	219	126	72	44	32	32
0,12	237	139	81	49	36	36
0,13	254	152	90	55	40	40
0,14	271	165	99	62	45	45
0,15	288	178	109	69	51	51
0,16	305	192	118	76	57	57
0,17	322	205	129	84	63	63
0,18	339	219	139	92	70	70
0,19	355	232	150	100	77	77
0,2	372	246	161	109	85	85
0,21	388	259	172	118	93	93
0,22	404	273	183	128	101	101
0,23	421	287	195	137	110	110
0,24	437	301	206	147	119	119
0,25	453	314	218	157	128	128
0,26	469	328	230	168	138	138
0,27	484	342	242	179	148	148
0,28	500	356	254	190	158	158

0,29	516	370	267	201	169	169
0,3	531	384	279	212	179	179
0,31	546	398	292	223	190	190
0,32	562	412	304	235	201	201
0,33	577	426	317	247	212	212
0,34	592	440	330	259	224	224
0,35	607	454	343	271	236	236
0,36	622	468	356	283	247	247
0,37	636	482	369	295	259	259
0,38	651	496	382	308	271	271
0,39	666	509	395	320	283	283
0,4	680	523	408	333	296	296
0,41	694	537	421	346	308	308
0,42	709	551	435	358	321	321
0,43	723	565	448	371	333	333
0,44	737	578	461	384	346	346
0,45	751	592	475	397	358	359
0,46	765	606	488	410	371	371
0,47	779	619	501	423	384	384
0,48	792	633	515	436	397	397
0,49	806	647	528	449	410	410
0,5	819	660	541	462	423	423
0,51	833	674	555	475	436	436
0,52	846	687	568	489	449	449
0,53	860	700	581	502	462	462
0,54	873	714	594	515	476	476
0,55	886	727	608	528	489	489
0,56	899	740	621	542	502	502
0,57	912	753	634	555	515	515
0,58	925	766	647	568	528	528
0,59	937	779	661	581	541	542
0,6	950	792	674	594	555	555
0,61	963	805	687	608	568	568
0,62	975	818	700	621	581	581
0,63	988	831	713	634	594	594
0,64	1000	844	726	647	607	608
0,65	1012	857	739	660	621	621
0,66	1024	869	752	673	634	634
0,67	1036	882	765	686	647	647
0,68	1048	894	778	699	660	660
0,69	1060	907	790	712	673	673
0,7	1072	919	803	725	686	686
0,71	1084	931	816	738	699	699
0,72	1096	944	828	751	712	712
0,73	1107	956	841	764	725	725
0,74	1119	968	854	777	738	738
0,75	1130	980	866	789	751	751

0,76	1142	992	878	802	764	764
0,77	1153	1004	891	815	776	776
0,78	1164	1016	903	827	789	789
0,79	1176	1028	915	840	802	802
0,8	1187	1040	928	852	815	815
0,81	1198	1051	940	865	827	827
0,82	1209	1063	952	877	840	840
0,83	1220	1074	964	890	852	852
0,84	1230	1086	976	902	865	865
0,85	1241	1097	988	914	877	877
0,86	1252	1109	1000	926	889	889
0,87	1262	1120	1012	938	902	902
0,88	1273	1131	1023	951	914	914
0,89	1283	1143	1035	963	926	926
0,9	1294	1154	1047	975	938	938
0,91	1304	1165	1058	987	950	950
0,92	1314	1176	1070	998	962	963
0,93	1325	1187	1081	1010	974	975
0,94	1335	1197	1093	1022	986	986
0,95	1345	1208	1104	1034	998	998
0,96	1355	1219	1115	1045	1010	1010
0,97	1365	1230	1126	1057	1022	1022
0,98	1374	1240	1138	1068	1033	1034
0,99	1384	1251	1149	1080	1045	1045
1	1394	1261	1160	1091	1057	1057

Температура пластинки за першу секунду:

$$t_{\text{пластинки 1}} = 1394 + 1261 + 1160 + 1091 + 1057 + 1057 = 1170 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Аналогічно проводимо розрахунки для другої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець першої секунди і на початок другої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.3):

$$t_{c1} = \frac{1394(29,3 \cdot 35 + 0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 35}{0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3} = 1442 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Вихідні дані для розрахунку за другу секунду без прогрівання при 20 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	1442
Температура повітря t_b , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	1170
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1000
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta=1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0=\lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

За допомогою формул (2.35), (2.36), (2.32) розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для другої секунди без прогрівання при 20 °С представлено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Розрахунок температурного поля для другої секунди без прогрівання при 20 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	1394	1261	1160	1091	1057	1057
1,01	1394	1266	1164	1096	1062	1062
1,02	1395	1270	1169	1101	1067	1067
1,03	1395	1273	1174	1106	1072	1072
1,04	1395	1277	1179	1111	1077	1077
1,05	1396	1280	1183	1116	1082	1082
1,06	1396	1282	1187	1121	1087	1087
1,07	1396	1285	1191	1125	1092	1092
1,08	1397	1288	1195	1130	1097	1097
1,09	1397	1290	1199	1135	1102	1102
1,1	1397	1292	1203	1139	1106	1107
1,11	1397	1295	1207	1144	1111	1112
1,12	1398	1297	1210	1148	1116	1116
1,13	1398	1299	1214	1153	1121	1121
1,14	1398	1301	1217	1157	1125	1126
1,15	1399	1303	1221	1161	1130	1130
1,16	1399	1305	1224	1165	1135	1135
1,17	1399	1307	1227	1169	1139	1139
1,18	1400	1309	1230	1173	1144	1144

1,19	1400	1311	1234	1177	1148	1148
1,2	1400	1312	1237	1181	1152	1153
1,21	1400	1314	1240	1185	1157	1157
1,22	1401	1316	1243	1189	1161	1161
1,23	1401	1318	1245	1193	1165	1165
1,24	1401	1319	1248	1196	1169	1169
1,25	1401	1321	1251	1200	1173	1173
1,26	1402	1322	1254	1203	1177	1177
1,27	1402	1324	1256	1207	1181	1181
1,28	1402	1325	1259	1210	1185	1185
1,29	1403	1327	1262	1214	1188	1189
1,3	1403	1328	1264	1217	1192	1192
1,31	1403	1330	1267	1220	1196	1196
1,32	1403	1331	1269	1223	1199	1200
1,33	1404	1333	1272	1227	1203	1203
1,34	1404	1334	1274	1230	1206	1207
1,35	1404	1336	1276	1233	1210	1210
1,36	1404	1337	1279	1236	1213	1214
1,37	1405	1338	1281	1239	1217	1217
1,38	1405	1340	1283	1242	1220	1220
1,39	1405	1341	1285	1245	1223	1223
1,4	1405	1342	1287	1247	1226	1227
1,41	1406	1343	1290	1250	1229	1230
1,42	1406	1345	1292	1253	1232	1233
1,43	1406	1346	1294	1256	1235	1236
1,44	1406	1347	1296	1258	1238	1239
1,45	1407	1348	1298	1261	1241	1242
1,46	1407	1349	1300	1263	1244	1245
1,47	1407	1350	1302	1266	1247	1247
1,48	1407	1352	1304	1268	1250	1250
1,49	1408	1353	1305	1271	1253	1253
1,5	1408	1354	1307	1273	1255	1256
1,51	1408	1355	1309	1276	1258	1258
1,52	1408	1356	1311	1278	1261	1261
1,53	1408	1357	1313	1280	1263	1263
1,54	1409	1358	1314	1282	1266	1266
1,55	1409	1359	1316	1285	1268	1268
1,56	1409	1360	1318	1287	1271	1271
1,57	1409	1361	1319	1289	1273	1273
1,58	1410	1362	1321	1291	1275	1276
1,59	1410	1363	1323	1293	1278	1278
1,6	1410	1364	1324	1295	1280	1280
1,61	1410	1365	1326	1297	1282	1283
1,62	1410	1366	1327	1299	1284	1285
1,63	1411	1367	1329	1301	1287	1287
1,64	1411	1368	1330	1303	1289	1289
1,65	1411	1368	1332	1305	1291	1291

1,66	1411	1369	1333	1307	1293	1293
1,67	1412	1370	1335	1309	1295	1295
1,68	1412	1371	1336	1310	1297	1297
1,69	1412	1372	1337	1312	1299	1299
1,7	1412	1373	1339	1314	1301	1301
1,71	1412	1373	1340	1316	1303	1303
1,72	1413	1374	1341	1317	1305	1305
1,73	1413	1375	1343	1319	1307	1307
1,74	1413	1376	1344	1321	1309	1309
1,75	1413	1377	1345	1322	1310	1311
1,76	1413	1377	1346	1324	1312	1312
1,77	1413	1378	1348	1325	1314	1314
1,78	1414	1379	1349	1327	1316	1316
1,79	1414	1380	1350	1329	1317	1318
1,8	1414	1380	1351	1330	1319	1319
1,81	1414	1381	1352	1332	1321	1321
1,82	1414	1382	1353	1333	1322	1323
1,83	1415	1382	1355	1334	1324	1324
1,84	1415	1383	1356	1336	1325	1326
1,85	1415	1384	1357	1337	1327	1327
1,86	1415	1384	1358	1339	1329	1329
1,87	1415	1385	1359	1340	1330	1330
1,88	1416	1386	1360	1341	1332	1332
1,89	1416	1386	1361	1343	1333	1333
1,9	1416	1387	1362	1344	1334	1335
1,91	1416	1387	1363	1345	1336	1336
1,92	1416	1388	1364	1346	1337	1338
1,93	1416	1389	1365	1348	1339	1339
1,94	1417	1389	1366	1349	1340	1340
1,95	1417	1390	1367	1350	1341	1342
1,96	1417	1390	1368	1351	1343	1343
1,97	1417	1391	1369	1352	1344	1344
1,98	1417	1391	1369	1353	1345	1346
1,99	1417	1392	1370	1355	1346	1347
2	1418	1393	1371	1356	1348	1348

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 2} = 1418 + 1393 + 1371 + 1356 + 1348 + 1348 = 1372 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Далі проводимо розрахунки для третьої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець другої секунди і на початок третьої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.5):

$$t_{c2} = \frac{1418(29,3 \cdot 17 + 0,005 \cdot 1000 \cdot 17 + 1000 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 17}{0,005 \cdot 1000 \cdot 17 + 1000 \cdot 29,3} = 1441 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.5.

Вихідні дані для розрахунку за третю секунду без прогрівання при 20 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	1441
Температура повітря t_b , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	1372
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1000
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	17
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Аналогічно розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для третьої секунди без прогрівання при 20 °С представлено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Розрахунок температурного поля для третьої секунди без прогрівання при 20 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2	1418	1393	1371	1356	1348	1348
2,01	1418	1393	1372	1357	1349	1349
2,02	1418	1394	1373	1358	1350	1350
2,03	1418	1394	1374	1359	1351	1351
2,04	1418	1395	1375	1360	1352	1353
2,05	1418	1395	1375	1361	1354	1354
2,06	1419	1396	1376	1362	1355	1355
2,07	1419	1396	1377	1363	1356	1356
2,08	1419	1397	1378	1364	1357	1357
2,09	1419	1397	1378	1365	1358	1358
2,1	1419	1398	1379	1366	1359	1359
2,11	1419	1398	1380	1367	1360	1360
2,12	1419	1399	1381	1368	1361	1361
2,13	1420	1399	1381	1369	1362	1362
2,14	1420	1399	1382	1370	1363	1363
2,15	1420	1400	1383	1370	1364	1364
2,16	1420	1400	1383	1371	1365	1365
2,17	1420	1401	1384	1372	1366	1366
2,18	1420	1401	1385	1373	1367	1367
2,19	1420	1402	1385	1374	1368	1368
2,2	1421	1402	1386	1375	1369	1369

2,21	1421	1402	1387	1375	1370	1370
2,22	1421	1403	1387	1376	1370	1371
2,23	1421	1403	1388	1377	1371	1371
2,24	1421	1404	1389	1378	1372	1372
2,25	1421	1404	1389	1379	1373	1373
2,26	1421	1404	1390	1379	1374	1374
2,27	1422	1405	1390	1380	1375	1375
2,28	1422	1405	1391	1381	1375	1376
2,29	1422	1405	1392	1381	1376	1376
2,3	1422	1406	1392	1382	1377	1377
2,31	1422	1406	1393	1383	1378	1378
2,32	1422	1407	1393	1384	1379	1379
2,33	1422	1407	1394	1384	1379	1379
2,34	1422	1407	1394	1385	1380	1380
2,35	1423	1408	1395	1386	1381	1381
2,36	1423	1408	1395	1386	1381	1382
2,37	1423	1408	1396	1387	1382	1382
2,38	1423	1409	1396	1387	1383	1383
2,39	1423	1409	1397	1388	1384	1384
2,4	1423	1409	1397	1389	1384	1384
2,41	1423	1409	1398	1389	1385	1385
2,42	1423	1410	1398	1390	1386	1386
2,43	1424	1410	1399	1390	1386	1386
2,44	1424	1410	1399	1391	1387	1387
2,45	1424	1411	1400	1392	1388	1388
2,46	1424	1411	1400	1392	1388	1388
2,47	1424	1411	1401	1393	1389	1389
2,48	1424	1412	1401	1393	1389	1390
2,49	1424	1412	1401	1394	1390	1390
2,5	1424	1412	1402	1394	1391	1391
2,51	1425	1412	1402	1395	1391	1391
2,52	1425	1413	1403	1395	1392	1392
2,53	1425	1413	1403	1396	1392	1392
2,54	1425	1413	1403	1396	1393	1393
2,55	1425	1414	1404	1397	1393	1394
2,56	1425	1414	1404	1397	1394	1394
2,57	1425	1414	1405	1398	1394	1395
2,58	1425	1414	1405	1398	1395	1395
2,59	1425	1415	1405	1399	1396	1396
2,6	1426	1415	1406	1399	1396	1396
2,61	1426	1415	1406	1400	1397	1397
2,62	1426	1415	1407	1400	1397	1397
2,63	1426	1416	1407	1401	1398	1398
2,64	1426	1416	1407	1401	1398	1398
2,65	1426	1416	1408	1402	1398	1399
2,66	1426	1416	1408	1402	1399	1399
2,67	1426	1416	1408	1402	1399	1400

2,68	1426	1417	1409	1403	1400	1400
2,69	1426	1417	1409	1403	1400	1400
2,7	1427	1417	1409	1404	1401	1401
2,71	1427	1417	1410	1404	1401	1401
2,72	1427	1418	1410	1404	1402	1402
2,73	1427	1418	1410	1405	1402	1402
2,74	1427	1418	1411	1405	1403	1403
2,75	1427	1418	1411	1406	1403	1403
2,76	1427	1418	1411	1406	1403	1404
2,77	1427	1419	1412	1406	1404	1404
2,78	1427	1419	1412	1407	1404	1404
2,79	1427	1419	1412	1407	1405	1405
2,8	1428	1419	1412	1407	1405	1405
2,81	1428	1419	1413	1408	1405	1406
2,82	1428	1420	1413	1408	1406	1406
2,83	1428	1420	1413	1409	1406	1406
2,84	1428	1420	1414	1409	1406	1407
2,85	1428	1420	1414	1409	1407	1407
2,86	1428	1420	1414	1410	1407	1407
2,87	1428	1421	1414	1410	1408	1408
2,88	1428	1421	1415	1410	1408	1408
2,89	1428	1421	1415	1410	1408	1408
2,9	1428	1421	1415	1411	1409	1409
2,91	1429	1421	1415	1411	1409	1409
2,92	1429	1422	1416	1411	1409	1409
2,93	1429	1422	1416	1412	1410	1410
2,94	1429	1422	1416	1412	1410	1410
2,95	1429	1422	1416	1412	1410	1410
2,96	1429	1422	1417	1413	1411	1411
2,97	1429	1422	1417	1413	1411	1411
2,98	1429	1423	1417	1413	1411	1411
2,99	1429	1423	1417	1413	1412	1412
3	1429	1423	1418	1414	1412	1412

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 3} = 1429 + 1423 + 1418 + 1414 + 1412 + 1412 = 1418 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Температуру середовища на кінець третьої секунди і на початок четвертої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.7):

$$t_{c3} = \frac{1429(29,3 \cdot 10 + 0,005 \cdot 1300 \cdot 10 + 1300 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 10}{0,005 \cdot 1300 \cdot 10 + 1300 \cdot 29,3} = 1440 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Таблиця 3.7

Вихідні дані для розрахунку температури середовища за четверту секунду без прогрівання при 20 °C

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °C	1440

Температура повітря t_b , °C	20
Температура пластинки t_0 , °C	1418
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1300
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	10
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583

Як ми бачимо проводити подальші розрахунки немає сенсу, так як температура середовища буде падати і поверхня пластинки не досягне 1539 °C. Залежність швидкості зміни температури пластинки і середовища представлена на рис. 3.1, дані до якого представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Зміна температури поверхні пластинки і температури середовища без прогрівання форми при 20 °C

Час, с	Температура поверхні пластинки, °C	Температура середовища, °C
0	2861	20
1	1442	1394
2	1441	1418
3	1440	1429

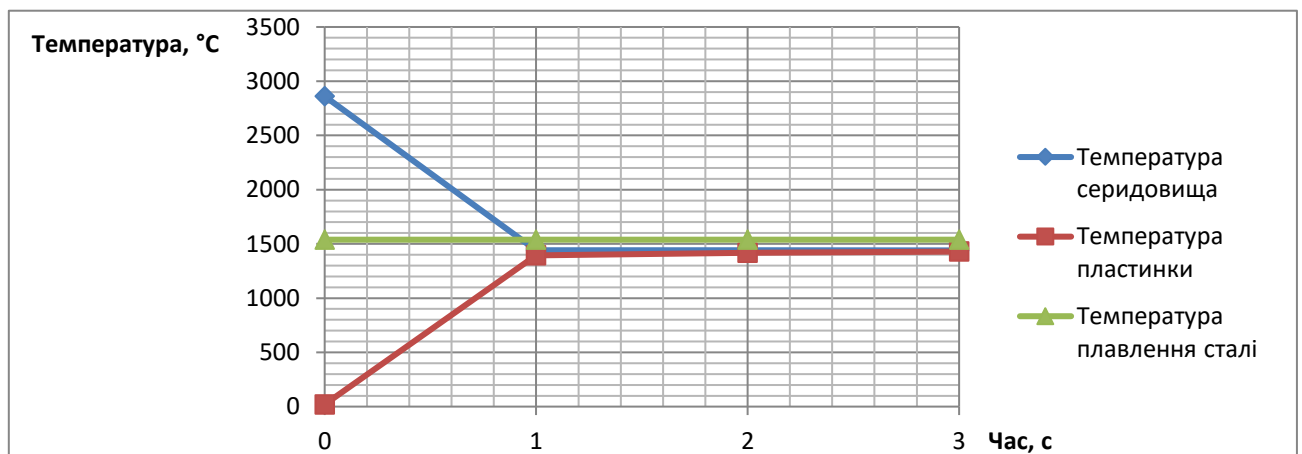


Рис. 3.1. Швидкість зміни температур пластинки і середовища за одиницю часу без нагрівання форми при 20 °C.

Отже, як ми бачимо з рис. 3.1. наплавляємий шар не приплавиться до поверхні пластинку.

Приступаємо до розрахунку температурного поля пластинки при прогріванні форми на 200 °C, який ведеться аналогічно до вище описаного. Для зменшення громіздкості таблиць результати у таблиці будемо записувати проміжні значення таблиць для розрахунку температурного поля пластинки. Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Вихідні дані для розрахунку за першу секунду при прогріванні до 200 °C

Показник	Значення
----------	----------

Температура середовища $t_c, ^\circ\text{C}$	2861
Температура повітря $t_b, ^\circ\text{C}$	20
Температура пластинки $t_0, ^\circ\text{C}$	200
Товщина пластинки $\delta, \text{м}$	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки $\alpha_c, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	2500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря $\alpha_b, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	64,5
Коефіцієнт температуропровідності $a, \text{м}^2/\text{с}$	0,0000114
Час впливу $\tau, \text{с}$	1
Шаг інтегрування $\Delta x, \text{м}$	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau, \text{с}$	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta=1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,43
$c_0=\lambda/\Delta x$	322500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Аналогічно розраховуємо температури в точках пластинки.

Результати розрахунку температурного поля для першої секунди з прогріванням до $200 ^\circ\text{C}$ представлено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Розрахунок температурного поля для першої секунди з прогріванням до $200 ^\circ\text{C}$

$\tau, \text{с}$	Координата $x, \text{см}$					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	200	200	200	200	200	200
0,1	398	297	242	216	207	207
0,2	581	435	339	282	256	256
0,3	750	579	458	382	346	346
0,4	907	723	589	502	459	459
0,5	1052	864	724	631	586	586
0,6	1187	1000	859	765	718	718
0,7	1311	1129	991	898	852	852
0,8	1426	1251	1118	1028	983	983
0,9	1533	1367	1239	1153	1110	1110
1	1632	1474	1354	1272	1231	1231

Температура пластинки за першу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 1} = 1632 + 1474 + 1354 + 1272 + 1231 + 1231 = 1366 ^\circ\text{C} .$$

Аналогічно проводимо розрахунки для другої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець першої секунди і на початок другої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.11):

$$t_{c1} = \frac{1632(29,3 \cdot 35 + 0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 35}{0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3} = 1688 ^\circ\text{C} .$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

Вихідні дані для розрахунку за другу секунду з прогріванням до 200 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	1688
Температура повітря t_v , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	1366
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1000
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_v , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Аналогічно розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для другої секунди з прогріванням до 200 °С представлено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Розрахунок температурного поля для другої секунди з прогріванням до 200 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	1632	1474	1354	1272	1231	1231
1,1	1635	1511	1405	1329	1290	1291
1,2	1639	1535	1445	1379	1345	1345
1,3	1642	1554	1477	1422	1392	1392
1,4	1645	1570	1505	1458	1432	1433
1,5	1648	1584	1529	1488	1467	1467
1,6	1650	1596	1549	1514	1496	1497
1,7	1653	1606	1566	1537	1521	1522
1,8	1655	1615	1581	1556	1543	1543
1,9	1657	1623	1593	1572	1561	1561
2	1659	1630	1604	1586	1576	1577

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 2} = 1659 + 1630 + 1604 + 1586 + 1576 + 1577 = 1605^\circ\text{С} .$$

Далі проводимо розрахунки для третьої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець другої секунди і на початок третьої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.13):

$$t_{c2} = \frac{1659(29,3 \cdot 17 + 0,005 \cdot 1000 \cdot 17 + 1000 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 17}{0,005 \cdot 1000 \cdot 17 + 1000 \cdot 29,3} = 1687^\circ\text{С} .$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13

Вихідні дані для розрахунку за третю секунду з прогріванням до 200 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	1687
Температура повітря t_b , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	1605
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1000
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	17
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 200 °С представлено в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14

Розрахунок температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 200 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2	1659	1630	1604	1586	1576	1577
2,1	1661	1636	1614	1598	1590	1590
2,2	1663	1641	1622	1608	1601	1601
2,3	1664	1645	1629	1617	1611	1611
2,4	1666	1649	1635	1625	1620	1620
2,5	1667	1653	1641	1632	1627	1627
2,6	1669	1656	1645	1638	1634	1634
2,7	1670	1659	1649	1643	1639	1640
2,8	1671	1661	1653	1647	1644	1644
2,9	1672	1663	1656	1651	1649	1649
3	1673	1665	1659	1655	1652	1653

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 3} = 1673 + 1665 + 1659 + 1655 + 1652 + 1653 = 1660 \text{ °С} .$$

Температуру середовища на кінець третьої секунди і на початок четвертої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.15):

$$t_{c3} = \frac{1673(29,3 \cdot 10 + 0,005 \cdot 1300 \cdot 10 + 1300 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 10}{0,005 \cdot 1300 \cdot 10 + 1300 \cdot 29,3} = 1686 \text{ °С} .$$

Таблиця 3.15

Вихідні дані для розрахунку температури середовища за четверту секунду з прогріванням до 200 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	1686
Температура повітря t_b , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	1660
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1300
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	10
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583

Залежність швидкості зміни температури пластинки і середовища представлена на рис. 3.2, дані до якого представлені в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16

Зміна температури поверхні пластинки і температури середовища з прогріванням форми до 200 °С

Час, с	Температура поверхні пластинки, °С	Температура середовища, °С
0	2861	200
1	1688	1632
2	1687	1659
3	1686	1660

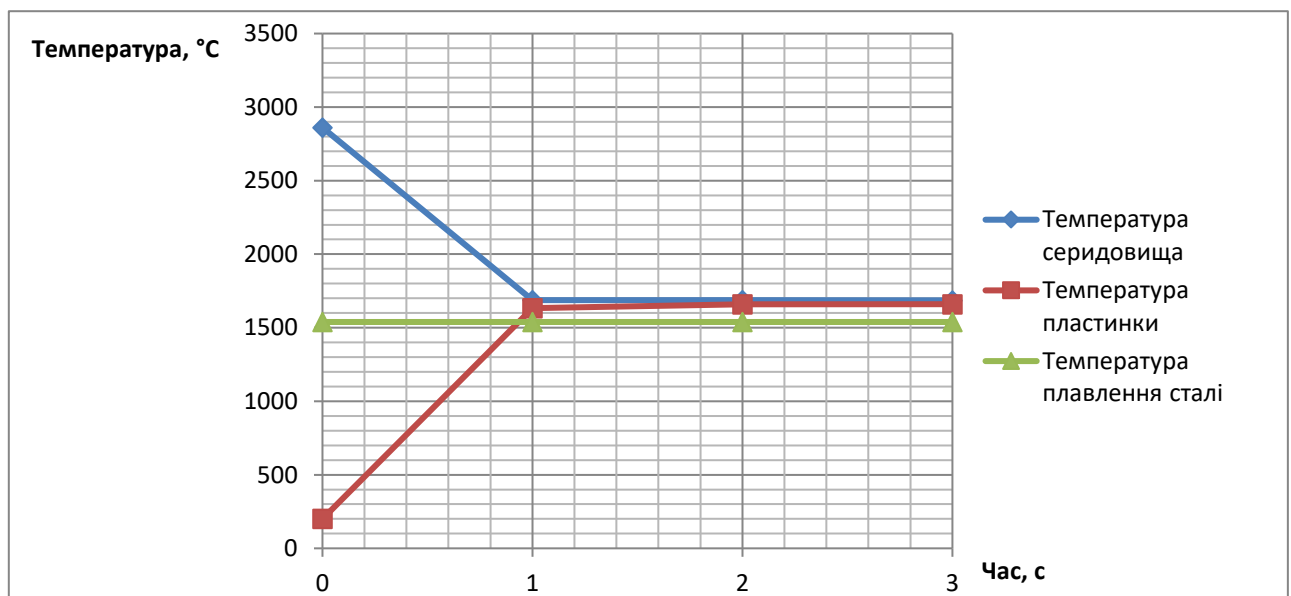


Рис. 3.2. Швидкість зміни температур пластинки і середовища за одиницю часу з прогріванням форми до 200 °С.

Як ми бачимо з рис. 3.2 наплавляємий шар приплавиться до поверхні пластинки.

Приступаємо до розрахунку температурного поля пластинки при прогріванні форми на 400 °С, який ведеться аналогічно до вище описаного. Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17

Вихідні дані для розрахунку за першу секунду при прогріванні до 400 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	2861
Температура повітря t_v , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	400
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	2500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_v , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	44
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000861
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,5695
$c_0 = \lambda / \Delta x$	220000

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки.

Результати розрахунку температурного поля для першої секунди з прогріванням до 400 °С представлено в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18

Розрахунок температурного поля для першої секунди з прогріванням до 400 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	400	400	400	400	400	400
0,1	663	515	443	414	404	404
0,2	898	685	553	479	447	447
0,3	1108	858	687	583	534	534
0,4	1295	1026	834	711	651	651
0,5	1462	1187	984	851	786	786
0,6	1612	1339	1134	998	930	930
0,7	1745	1481	1279	1144	1076	1077
0,8	1864	1612	1418	1287	1221	1221
0,9	1971	1733	1550	1424	1361	1361
1	2066	1844	1672	1554	1494	1495

Температура пластинки за першу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 1} = 2066 + 1844 + 1672 + 1554 + 1494 + 1495 = 1686 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Аналогічно проводимо розрахунки для другої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець першої секунди і на початок другої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.19):

$$t_{c1} = \frac{2066(29,3 \cdot 35 + 0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 35}{0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3} = 2137 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.19.

Таблиця 3.19

Вихідні дані для розрахунку за другу секунду з прогріванням до 400 °C

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °C	2137
Температура повітря t_b , °C	20
Температура пластинки t_0 , °C	1688
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1000
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для другої секунди з прогріванням до 400 °C представлено в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20

Розрахунок температурного поля для другої секунди з прогріванням до 400 °C

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	2066	1844	1672	1554	1494	1495
1,1	2071	1895	1744	1636	1580	1580
1,2	2075	1928	1800	1707	1658	1658
1,3	2079	1954	1846	1767	1725	1725
1,4	2083	1977	1885	1818	1782	1783
1,5	2087	1996	1918	1861	1831	1831
1,6	2090	2013	1946	1898	1872	1873
1,7	2093	2027	1971	1929	1908	1908
1,8	2096	2040	1991	1956	1938	1938
1,9	2099	2050	2009	1979	1963	1964

2	2101	2060	2024	1999	1985	1986
---	------	------	------	------	------	------

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 2} = 2101 + 2060 + 2024 + 1999 + 1985 + 1986 = 2026^{\circ}\text{C}.$$

Далі проводимо розрахунки для третьої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець другої секунди і на початок третьої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.21.

$$t_{c2} = \frac{2101(29,3 \cdot 16 + 0,005 \cdot 1100 \cdot 16 + 1100 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 16}{0,005 \cdot 1100 \cdot 16 + 1100 \cdot 29,3} = 2131^{\circ}\text{C}.$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.21.

Таблиця 3.21

Вихідні дані для розрахунку за третю секунду з прогріванням до 400 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	2131
Температура повітря t_b , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	2026
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1100
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	16
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 400 °С представлено в таблиці 3.22.

Таблиця 3.22

Розрахунок температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 400 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2	2101	2060	2024	1999	1985	1986
2,1	2103	2068	2038	2015	2004	2004
2,2	2105	2075	2049	2030	2020	2020
2,3	2107	2081	2058	2042	2034	2034
2,4	2109	2086	2067	2053	2046	2046
2,5	2111	2091	2074	2062	2056	2056
2,6	2112	2095	2080	2070	2065	2065
2,7	2113	2099	2086	2077	2072	2073

2,8	2115	2102	2091	2083	2079	2079
2,9	2116	2105	2095	2088	2085	2085
3	2117	2107	2099	2093	2090	2090

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 3} = 2117 + 2107 + 2099 + 2093 + 2090 + 2090 = 2099 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Температуру середовища на кінець третьої секунди і на початок четвертої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.23):

$$t_{c3} = \frac{2131(29,3 \cdot 10 + 0,005 \cdot 1500 \cdot 10 + 1500 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 10}{0,005 \cdot 1500 \cdot 10 + 1500 \cdot 29,3} = 1686 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Таблиця 3.23

Вихідні дані для розрахунку температури середовища за четверту секунду з прогріванням до 400 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	2131
Температура повітря t_v , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	2099
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_v , Вт/м ² ·К	10
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583

Залежність швидкості зміни температури пластинки і середовища представлена на рис. 3.3, дані до якого представлені в таблиці 3.24.

Таблиця 3.24

Зміна температури поверхні пластинки і температури середовища з прогріванням форми до 400 °С

Час, с	Температура поверхні пластинки, °С	Температура середовища, °С
0	2861	400
1	2137	2066
2	2131	2101
3	2131	2117

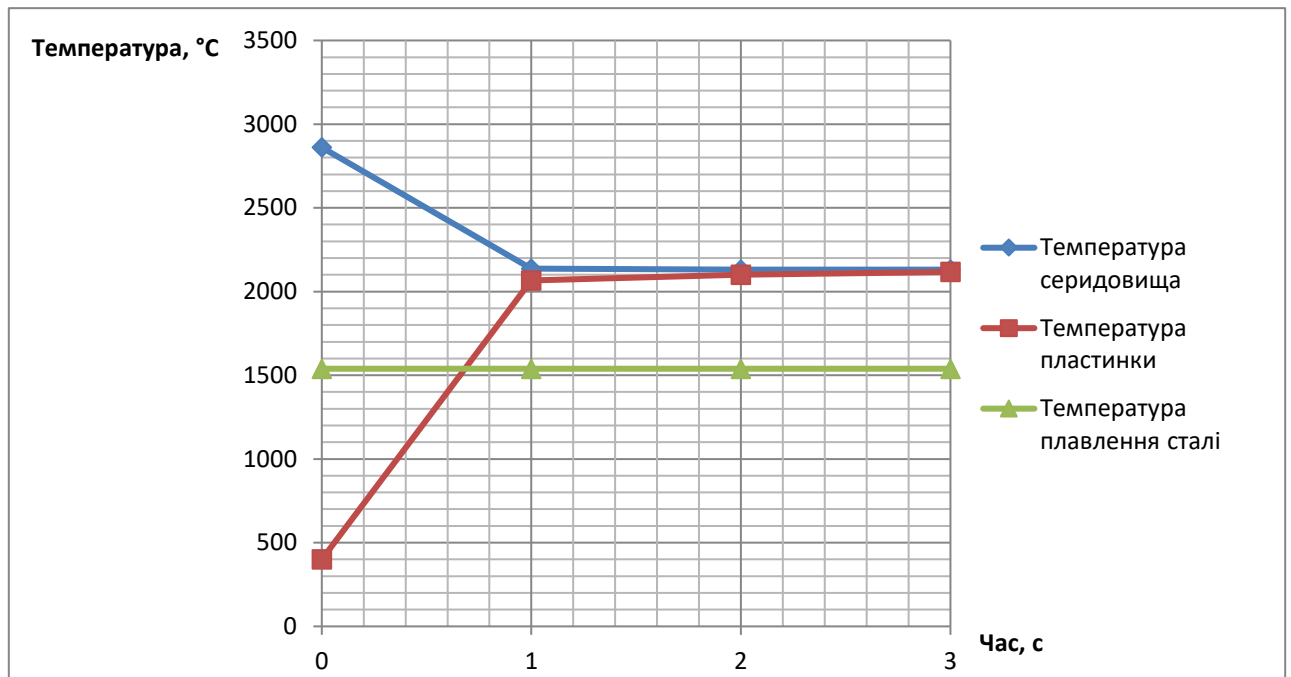


Рис. 3.3. Швидкість зміни температур пластинки і середовища за одиницю часу з прогріванням форми до 400 °С.

Як ми бачимо з рис. 3.3 наплавляємий шар приплавиться до поверхні пластинки.

Приступаємо до розрахунку температурного поля пластинки при прогріванні форми на 600 °С, який ведеться аналогічно до вище описаного. Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.25.

Таблиця 3.25

Вихідні дані для розрахунку за першу секунду при прогріванні до 600 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	2861
Температура повітря t_v , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	600
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	2500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_v , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda / \Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки.

Результати розрахунку температурного поля для першої секунди з прогріванням до 600 °С представлено в таблиці 3.26.

Таблиця 3.26

Розрахунок температурного поля для першої секунди з прогріванням до 600 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	600	600	600	600	600	600
0,1	952	728	638	609	602	602
0,2	1249	930	751	663	629	629
0,3	1500	1130	892	757	697	697
0,4	1712	1317	1044	876	798	798
0,5	1891	1488	1197	1011	921	921
0,6	2042	1644	1348	1153	1057	1057
0,7	2169	1785	1493	1297	1199	1199
0,8	2277	1912	1630	1438	1342	1342
0,9	2368	2026	1758	1574	1481	1481
1	2445	2128	1877	1703	1614	1615

Температура пластинки за першу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 1} = 2445 + 2128 + 1877 + 1703 + 1614 + 1615 = 1897 \text{ °С} .$$

Аналогічно проводимо розрахунки для другої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець першої секунди і на початок другої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.27):

$$t_{c1} = \frac{2066(29,3 \cdot 35 + 0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 35}{0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3} = 2137 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.27.

Таблиця 3.27

Вихідні дані для розрахунку за другу секунду з прогріванням до 600 °C

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °C	2529
Температура повітря t_v , °C	20
Температура пластинки t_0 , °C	1897
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1000
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_v , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda / \Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для другої секунди з прогріванням до 600 °C представлено в таблиці 3.28.

Таблиця 3.28

Розрахунок температурного поля для другої секунди з прогріванням до 600 °C

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	2445	2128	1877	1703	1614	1615
1,1	2450	2197	1979	1822	1740	1740
1,2	2455	2243	2059	1924	1853	1853
1,3	2460	2281	2125	2011	1950	1951
1,4	2465	2313	2181	2084	2033	2033
1,5	2469	2340	2228	2146	2103	2103
1,6	2473	2363	2268	2199	2162	2163
1,7	2477	2383	2303	2243	2212	2213
1,8	2480	2401	2332	2282	2255	2256
1,9	2483	2415	2357	2314	2292	2292
2	2486	2428	2378	2342	2323	2323

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 2} = 2486 + 2428 + 2378 + 2342 + 2323 + 2323 = 2380 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Далі проводимо розрахунки для третьої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець другої секунди і на початок третьої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.29).

$$t_{c2} = \frac{2486(29,3 \cdot 16 + 0,005 \cdot 1100 \cdot 16 + 1100 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 16}{0,005 \cdot 1100 \cdot 16 + 1100 \cdot 29,3} = 2522 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.29.

Таблиця 3.29

Вихідні дані для розрахунку за третю секунду з прогріванням до 600 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	2522
Температура повітря t_b , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	2380
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1100
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	16
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda / \Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 600 °С представлено в таблиці 3.30.

Таблиця 3.30

Розрахунок температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 600 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2	2486	2428	2378	2342	2323	2323
2,1	2489	2439	2397	2365	2349	2349
2,2	2491	2449	2412	2386	2372	2372
2,3	2493	2457	2426	2403	2391	2391
2,4	2496	2464	2437	2418	2408	2408
2,5	2497	2470	2447	2431	2422	2422
2,6	2499	2476	2456	2442	2434	2434
2,7	2501	2481	2463	2451	2445	2445
2,8	2502	2485	2470	2459	2454	2454
2,9	2504	2489	2476	2466	2462	2462
3	2505	2492	2481	2473	2469	2469

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки 3}} = 2505 + 2492 + 2481 + 2473 + 2469 + 2469 = 2481 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Температуру середовища на кінець третьої секунди і на початок четвертої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.31):

$$t_{c3} = \frac{2131(29,3 \cdot 10 + 0,005 \cdot 1500 \cdot 10 + 1500 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 10}{0,005 \cdot 1500 \cdot 10 + 1500 \cdot 29,3} = 2522 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Таблиця 3.31

Вихідні дані для розрахунку температури середовища за четверту секунду з прогріванням до 600 °C

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °C	2522
Температура повітря t_b , °C	20
Температура пластинки t_0 , °C	2481
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	10
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583

Залежність швидкості зміни температури пластинки і середовища представлена на рис. 3.4, дані до якого представлені в таблиці 3.32.

Таблиця 3.32

Зміна температури поверхні пластинки і температури середовища з прогріванням форми до 600 °C

Час, с	Температура поверхні пластинки, °C	Температура середовища, °C
0	2861	600
1	2529	2445
2	2522	2486
3	2522	2505

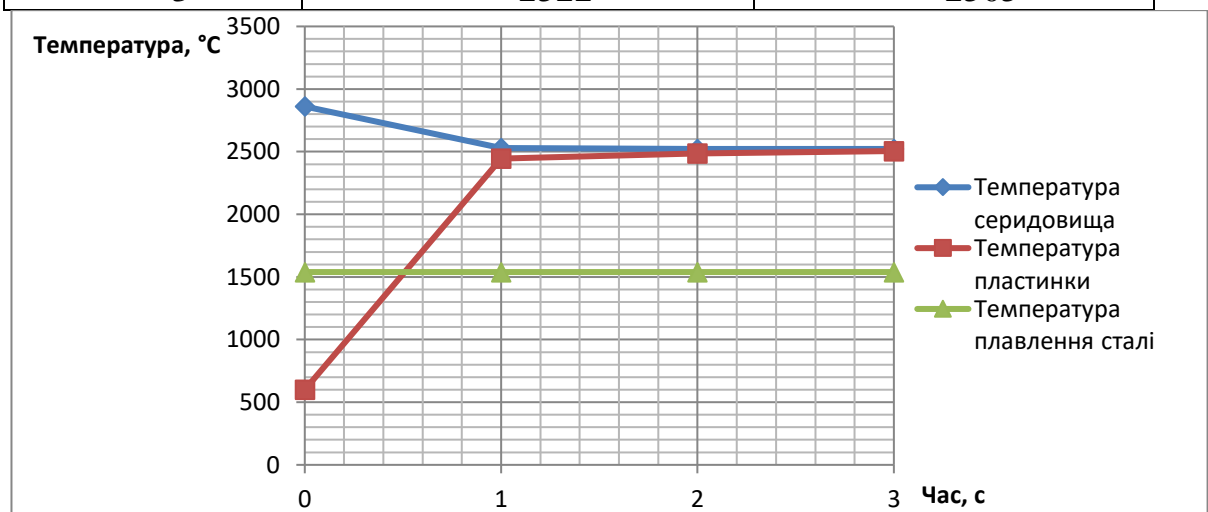


Рис. 3.4. Швидкість зміни температур пластинки і середовища за одиницю часу з прогріванням форми до 600 °C.

Як ми бачимо з рис. 3.4 наплавляємий шар приплавиться до поверхні пластинки.

Приступаємо до розрахунку температурного поля пластинки при прогріванні форми на 650 °С, який ведеться аналогічно до вище описаного. Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.33.

Таблиця 3.33

Вихідні дані для розрахунку за першу секунду при прогріванні до 650 °С

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °С	2861
Температура повітря t_v , °С	20
Температура пластинки t_0 , °С	650
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	2500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_v , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000528
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta=1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,736
$c_0=\lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки.

Результати розрахунку температурного поля для першої секунди з прогріванням до 650 °С представлено в таблиці 3.34.

Таблиця 3.34

Розрахунок температурного поля для першої секунди з прогріванням до 650 °С

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	650	650	650	650	650	650
0,1	994	769	683	657	651	652
0,2	1285	961	786	703	673	673
0,3	1530	1153	917	786	729	730
0,4	1737	1333	1059	893	817	817
0,5	1912	1498	1203	1016	927	927
0,6	2060	1648	1345	1147	1050	1050
0,7	2185	1785	1482	1281	1181	1181
0,8	2290	1907	1612	1413	1313	1314
0,9	2379	2018	1735	1542	1444	1445
1	2454	2116	1849	1665	1572	1572

Температура пластинки за першу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 1} = 2454 + 2116 + 1849 + 1665 + 1572 + 1572 = 1871 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Аналогічно проводимо розрахунки для другої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець першої секунди і на початок другої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.35):

$$t_{c1} = \frac{2454(29,3 \cdot 35 + 0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 35}{0,005 \cdot 1000 \cdot 35 + 1000 \cdot 29,3} = 2539 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.35.

Таблиця 3.35

Вихідні дані для розрахунку за другу секунду з прогріванням до 650 °C

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °C	2539
Температура повітря t_b , °C	20
Температура пластинки t_0 , °C	1871
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1000
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	35
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для другої секунди з прогріванням до 650 °C представлено в таблиці 3.36.

Таблиця 3.36

Розрахунок температурного поля для другої секунди з прогріванням до 650 °C

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	2454	2116	1849	1665	1572	1572
1,1	2459	2190	1959	1792	1705	1705
1,2	2465	2239	2044	1900	1825	1825
1,3	2470	2279	2114	1992	1928	1928
1,4	2474	2313	2173	2070	2016	2016
1,5	2478	2342	2223	2136	2090	2090
1,6	2482	2366	2266	2192	2153	2153
1,7	2486	2387	2302	2239	2206	2207
1,8	2489	2405	2333	2280	2252	2252
1,9	2493	2421	2359	2314	2290	2291
2	2496	2434	2382	2343	2323	2324

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки } 2} = 2496 + 2434 + 2382 + 2343 + 2323 + 2324 = 2384^{\circ}\text{C}.$$

Далі проводимо розрахунки для третьої секунди змінюючи вихідні дані.

Температуру середовища на кінець другої секунди і на початок третьої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.37).

$$t_{c2} = \frac{2496(29,3 \cdot 16 + 0,005 \cdot 1100 \cdot 16 + 1100 \cdot 29,3) - 20 \cdot 29,3 \cdot 16}{0,005 \cdot 1100 \cdot 16 + 1100 \cdot 29,3} = 2532^{\circ}\text{C}.$$

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.37.

Таблиця 3.37

Вихідні дані для розрахунку за третю секунду з прогріванням до 650 °C

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °C	2532
Температура повітря t_b , °C	20
Температура пластинки t_0 , °C	2384
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1100
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	16
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583
Час впливу τ , с	1
Шаг інтегрування Δx , м	0,0002
Шаг інтегрування $\Delta \tau$, с	0,001
Правильний шаг інтегрування $\beta = 1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2}$	0,7085
$c_0 = \lambda/\Delta x$	146500

Як ми бачимо шаги інтегрування задовольняє умови $0 \leq \beta \leq 1$, значить вибрані шаги інтегрування правильні. Продовжуємо розрахунок.

Розраховуємо температури в точках пластинки. Результати розрахунку температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 650 °C представлено в таблиці 3.38.

Таблиця 3.38

Розрахунок температурного поля для третьої секунди з прогріванням до 650 °C

τ , с	Координата x , см					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2	2496	2434	2382	2343	2323	2324
2,1	2498	2446	2401	2368	2351	2351
2,2	2501	2456	2417	2389	2375	2375
2,3	2503	2465	2432	2408	2395	2395
2,4	2505	2472	2444	2423	2412	2413
2,5	2507	2478	2454	2437	2427	2428
2,6	2509	2484	2463	2448	2440	2441
2,7	2510	2489	2471	2458	2451	2452
2,8	2512	2493	2478	2467	2461	2461
2,9	2513	2497	2484	2474	2469	2469
3	2515	2501	2489	2481	2476	2477

Температура пластинки за другу секунду:

$$t_{\text{пластинки 3}} = 2515 + 2501 + 2489 + 2481 + 2476 + 2477 = 2490 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температуру середовища на кінець третьої секунди і на початок четвертої знаходимо за формулою (2.37) (дані для розрахунку беремо з таблиці 3.39):

$$t_{c3} = \frac{2515(29,3 \cdot 10 + 0,005 \cdot 1500 \cdot 10) + 1500 \cdot 29,3 - 20 \cdot 29,3 \cdot 10}{0,005 \cdot 1500 \cdot 10 + 1500 \cdot 29,3} = 2531 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таблиця 3.39

Вихідні дані для розрахунку температури середовища за четверту секунду з прогріванням до 650 °C

Показник	Значення
Температура середовища t_c , °C	2531
Температура повітря t_b , °C	20
Температура пластинки t_0 , °C	2490
Товщина пластинки δ , м	0,005
Коефіцієнт тепловіддачі від рідкої сталі до пластинки α_c , Вт/м ² ·К	1500
Коефіцієнт тепловіддачі від пластинки в повітря α_b , Вт/м ² ·К	10
Коефіцієнт теплопровідності пластинки $\lambda_{ст}$, Вт/м·К	29,3
Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с	0,00000583

Залежність швидкості зміни температури пластинки і середовища представлена на рис. 3.5, дані до якого представлені в таблиці 3.40.

Таблиця 3.40

Зміна температури поверхні пластинки і температури середовища з прогріванням форми до 650 °C

Час, с	Температура поверхні пластинки, °C	Температура середовища, °C
0	2861	650
1	2539	2454
2	2532	2496
3	2531	2515

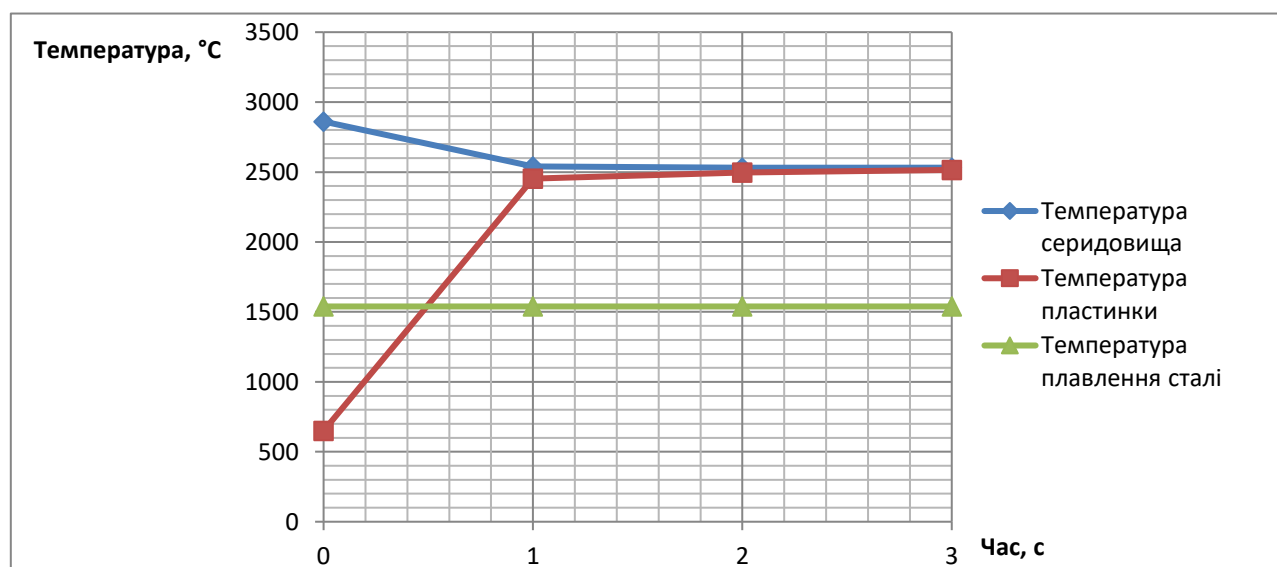


Рис. 3.5. Швидкість зміни температур пластинки і середовища за одиницю часу з прогріванням форми до 650 °C.

Як ми бачимо з рис. 3.5 наплавляємий шар приплавиться до поверхні пластинки.

Отже, провівши дослідження, ми бачимо, що без прогрівання припавлення наплавляємого шару до поверхні пластинки не відбувається. Чим вище температура прогріву форми, тим краще і якісніше відбувається процес напавлення методом СВС, без пор і раковин у наплавляємому шару. Для ідеальної моделі за результатами дослідження, щоб відбулося припавлення наплавляємого шару, прогрівати форму треба вище 200 °С. При врахуванні теплопередачі форми, розсіювання теплової енергії у навколишнє середовище - ці температури повинні бути значно вище. Для знаходження цих температур рекомендовано провести додаткові розрахунки і експерименти.

Температуро-часові параметри процесу отримання функціонального шару

З урахуванням часу нагріву форми отримали такі залежності, що показані на рисунку 3.6.

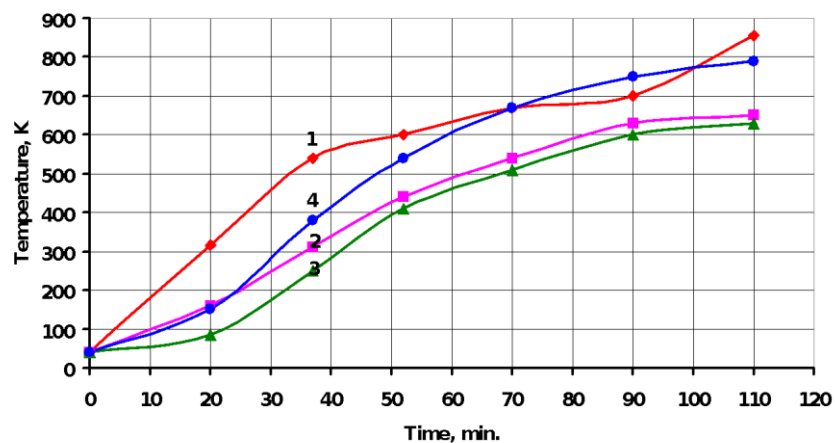


Рис. 3.6. Вплив часу нагріву форми на температури в її зонах: 1 – температура стінки; 2 – температура середовища під виливком; 3 – температура у зоні напавлення шару; 4 – температура термітної шихти та утвореного металу.

Збільшення швидкості нагріву формувальної суміші ливарної форми відбувається через перерозподіл енергії між реагуючою шихтою та стінкою форми.

Для зменшення часу нагрівання, а отже й витрат енергоресурсів, була зроблена форма з контактуючою з атмосферою металевою основою (рис. 3.7).

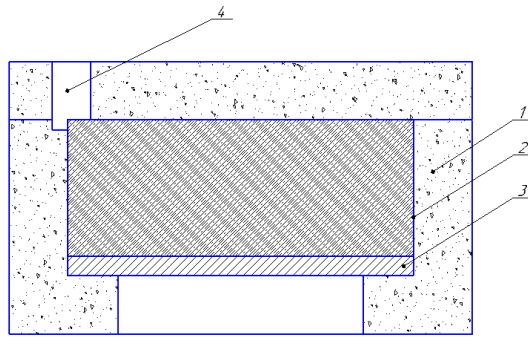


Рис. 3.7. Форма з відкритою металевою основою: 1 – формувальна суміш; 2 – шихта; 3 – основа; 4 – отвір для запалювання та газовідведення

Це дозволило скоротити час нагріву ливарної форми зі 120 хв. до 90 хв. Проте, відкрита нижня частина основи вносить суттєві зміни температурний режим отримання функціонального шару як масивний холодильник.

Після початку горіння шихти, на 0,5 с. спостерігається зменшення температури нижньої поверхні основи на протязі 3,5-4 с. (рис. 3.8, крива 1). Це зумовлено вливом температури атмосферного повітря.

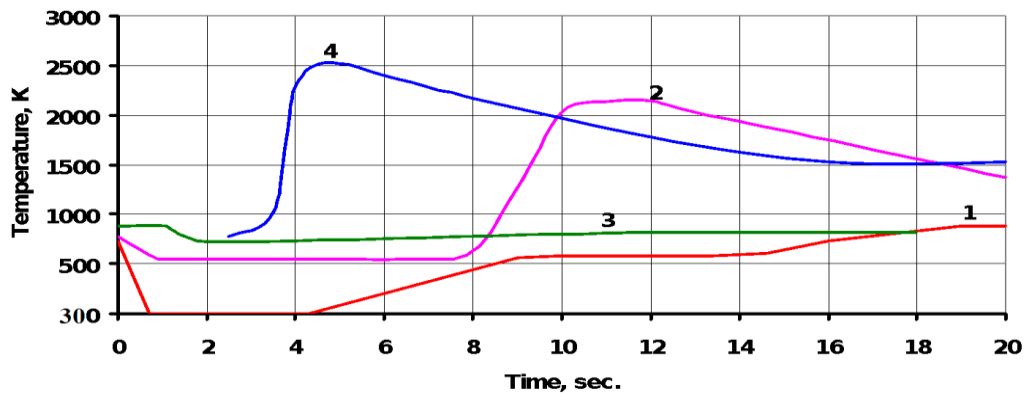


Рис. 3.7. Зміна температури в ливарній формі: 1 – нижня поверхня металевої основи; 2 – верхня поверхня металевої основи; 3 – формувальна суміш; 4 – температура в нижній зоні реактору

Аналіз даних, отриманих з встановлених термопар на верхній поверхні металевої основи (рис. 3.8. крива 2), дозволив виявити, що за 8,5 с. згоряє уся шихта після чого фронт горіння доходить до металевої основи і її температура різко підвищується до 2150 К усього за 1 с.. Це говорить про початок процесу утворення функціонального шару. В зоні зварювання шару з основою температура протягом наступних 5-7 с опускається до температури, нижче ліквідуса для поверхневого шару поверхні основи. Цього часу вистачає для приварювання шарів основи і функціонального сплаву.

Температура формувальної суміші (рис. 3.8 крива 3) спочатку стрімко (протягом 0,5-1 с) знижується з 874 К до 724 К через підсмоктування повітря через газопроникнену форму, а потім повільно збільшується протягом наступних 10 с. В експериментах спостерігалось утворення гарнісажу на внутрішніх стінках форми, що й зумовлює певні температурно-часові режими її нагріву.

Умови для утворення розплаву функціонального шару (температура вище, ніж ліквідус) залишаються протягом 12 с. За цей час температура термітного розплаву зменшується до 1500 К. (рис. 3.8, крива 4)

4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ЛИТИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ШАРАМИ

У даній роботі запропонований альтернативний метод наплавлення металу: замість наплавлення порошковою стрічкою, яка потребує додаткового обладнання, використовується отримання функціонального шару методом СВС. При використанні даного методу очікується зменшення собівартості виготовлення виробу, покращення якості і збільшення експлуатаційного терміну використання лиття.

Суть традиційного методу (на прикладі компанії «Steel Work»), полягає в тому, що порошкова стрічка подається на підготовлену поверхню вилівка і за допомогою зварювального апарату наплавляється на поверхню вилівка. Підготовка поверхні включає в себе обов'язкове очищення та знежирення поверхні, підігрів всього відливка для підвищення ефективності процесу поверхневого проникнення.

Суть запропонованого нами методу полягає в тому, що на підготовлену поверхню вилівка насипається порошок визначеного складу та екзотермічна суміш, до складу якої входять металічна основа та термітна суміш. Підготовка поверхні вилівка також включає в себе очищення, знежирення і підігрів вже разом із екзотермічною сумішшю. За рахунок високих температур і відбувається наплавлення.

Загальна величина капіталовкладень за ринковими цінами необхідного устаткування буде дорівнювати:

$$KB = 297,7 + 350 + 250 + 250 = 1147,7 \text{ тис. грн.}$$

Для визначення основних питомих показників економічної ефективності важливим є розуміння продуктивності підприємства чи ливарного цеху по виготовленню лиття. Тому розраховували планову виробничу програму.

За базову технологію порівняння брали діяльність підприємства «Steel Work», яке використовує процес наплавлення зносостійкого покриття на майже 41% від загального випуску продукції.

Час простоїв обладнання із-за ремонту становить 1150 год.

Годинна продуктивність нагріваючої печі 2 т/год., а ефективний час роботи печі:

$$T_{ef} = T_{ном} + T_{пр} \text{ год.},$$

де номінальний час роботи печі при двозмінному восьмигодинному режимі роботи становить:

$$T_{ном} = 20 \times 12 \times 2 \times 8 = 3840 \text{ год.}$$

Значить ефективний час роботи

$$T_{ef} = 3840 - 1150 = 2690 \text{ год.}$$

Кількість випуску готової литої продукції розраховується за формулою:

$$Q_{річн}^{mex} = T_{ef} \times \Pi_{год} \text{ т/рік}$$

Отже величина становитиме

$$Q_{річн}^{mex} = 2690 \times 2 = 5380 \text{ т/рік,}$$

а кількість випуску продукції зі зносостійким покриттям становить 2205 т/рік.

При впровадженні запропонованого нами варіанту номінальний час роботи залишається незмінним – 3840 год, час простоїв обладнання зменшується за рахунок зменшення циклу виготовлення однієї одиниці продукції і становить 1144 год. Тому ефективний час роботи та річний випуск продукції відповідно дорівнюватимуть

$$T_{ef} = 3840 - 1144 = 2696 \text{ год.},$$

$$Q_{річн}^{mex} = 2696 \times 2 = 5392 \text{ т/рік.}$$

Кількість же випуску продукції зносостійкого покриття наплавленням з використання запропонованого методу становитиме – 3612 т/рік.

Збільшення обсягу виробництва продукції зносостійкого покриття складе

$$\Delta Q = Q_{річн}^2 - Q_{річн}^1 = 3612 - 2205 = 1407 \text{ т/рік.},$$

що у відносному відхиленні дорівнює

$$\Delta Q_{\%} = \Delta Q / Q_{річн}^2 = 1407 / 2205 \times 100 = 63,8 \text{ \%}.$$

Порівнюваним показником є також і собівартість виготовлення продукції. Для її формування визначали кількість і вартість матеріалів необхідних для здійснення процесів за обома порівнюваними варіантами (табл. 3.1 та 3.2).

Таблиця 3.1 – Вартість матеріальних ресурсів на нанесення зносостійкого покриття базовим методом

Назва матеріалу	Ціна	Кількість використання на 1 т		Кількість використання на весь Q=2205 т/рік	
		нат. од	грн.	нат. од	тис. грн.
1.Сировина і матеріали:					
Основні:					
Сталевий лист 3м×3м, шт.	690	1	690	2205	1521,45

Порошкова стрічка, кг	170	421,2	71604	928746	157886,82
Додаткові:					
Електроди, кг	15	7	105	15435	231,52
Разом матеріали			72399		159639,79
2. Енергетичні запаси					
Електроенергія, кВт·год	8,5	780	6630	1719900	14619,15
Стиснуте повітря, м ³	10,2	17	173,4	37485	382,38
Газ, м ³	15,0	1	15,0	2205	330,75
Масило, л	19	1,2	22,8	2646	50,27
Разом енергоносії			6841,2		15382,55
Всього			79240,2		175022,34

Таблиця 3.2 – Вартість матеріальних ресурсів на виготовлення зносостійкого покриття запропонованим методом

Назва матеріалу	Ціна	Кількість використання на 1 т		Кількість використання на весь Q=3612 т/рік	
		нат. од	грн.	нат. од	тис. грн.
1. Сировина і матеріали:					
Основні:					
Сталевий лист 3м×3м, шт.	690	1	690	3612	2492,28
Алюмінієвий порошок, кг	50	126	6300	455112	2275560,00
Хромо-нікелевий порошок, кг	300	105	31500	379260	113778,00
Титановий порошок, кг	500	3,5	1750	12642	6321,00
Ванадієвий порошок, кг	300	0,7	210	2528,4	758,52
Кріоліт, кг	60	14	840	50568	3034,08
Залізний порошок, кг	30	140	4200	505680	15170,40
Марганцевий порошок, кг	40	10,5	420	37926	1517,04
Окалина, кг	0,6	294	176,4	1061928	637,16
Додаткові:					
Термопаста, кг	10	14	140	50568	505,68
Вогнетрив, кг	150	5	750	18060	2709,00
Разом матеріали			46976,4		374483,16
2. Енергетичні запаси					
Електроенергія, кВт·год	8,5	890	7565	3214680	27324,78
Стиснуте повітря, м ³	10,2	13	132,6	46956	478,95
Вода, м ³	40	9	360	32508	1300,32
Масило, л	19	1,7	32,3	6140,4	116,67

Разом енергоносії	8089,9		29220,72
Всього	55066,3		2451703,88

Таким чином, впровадження запропонованого методу дозволить заощадити кошти на вихідних матеріалах на

$$E_m = 72399 - 46976,4 = 19375,4 \text{ грн./т,}$$

що складає

$$E_m^{\%} = 19375,4 / 72399 = 26,8 \%,$$

але збільшуються витрати на енергетичні запаси на

$$\Delta V_{ен} = 8089,9 - 6841,2 = +1248,7 \text{ грн./т,}$$

що складає

$$\Delta V_{ен}^{\%} = 1248,7 / 6841,2 = +18,3 \%,$$

але це компенсується виведенням з процесу нагрівання вилівка природного газу та зменшенням собівартості виготовлення 1 т продукції.

Характеристикою ефективного використання працівників є продуктивність праці, що характеризує величину віддачі кожного окремого працівника для підприємства.

Розраховували продуктивність праці робітників цеху за рік за формулою:

$$ПП = \frac{Q}{\text{Ч}} \text{ т/особу,}$$

$$ПП^1 = \frac{2205}{29} = 76,03 \text{ т/особу,}$$

$$ПП^2 = \frac{3612}{30} = 120,40 \text{ т/особу,}$$

Збільшення кількості працівників задіяних в процесі пояснюється приростом трудомісткості робіт пов'язаних з приготуванням екзотермічної суміші. Але навіть попри це продуктивність праці збільшилася на

$$\Delta ПП = 120,40 - 76,03 = 44,37 \text{ т/особу,}$$

або на

$$\Delta ПП^{\%} = 44,37 / 76,03 \times 100 = 58,4 \%.$$

Для визначення собівартості використали розраховані вже витрати на виробничі запаси (табл. 3.1 та 3.2), але необхідні ще витрати на заробітну плату, утримання машин і механізмів, загально виробничі витрати та накладні витрати.

В таблиці 3.3 як раз і відображено формування собівартості до і після впровадження наших пропозицій.

Таблиця 3.3 – Калькуляція собівартості лиття з зносостійким покриттям

Статі витрат	Всього витрат, тис. грн.		Витрати на од. продукції, грн./т		Питома вага, %	
	до	після	до	після	до	після
	впровадження		впровадження		впровадження	
Заробітна плата з відрахуваннями	815,885	878,292	369,93	243,13	0,45	0,44
Витрати на енергетичні запаси	15382,55	29220,72	6841,2	8089,9	8,57	14,59
Витрати на матеріали	159639,79	374483,16	72399	46976,4	90,72	84,70
Обслуговування і ремонт обладнання	171,67		77,85	47,53	0,09	0,08
Амортизація	59,128	108,282	26,81	29,97	0,03	0,05
Інші витрати	263,18	283,32	119,36	78,44	0,14	0,14
Разом	176332,20	405145,44	79801,15	55465,37	100	

За даними таблиці 3.3 бачимо, що впровадження методу виготовлення відливків із литими функціональними шарами за допомогою екзотермічної суміші дозволяє заощадити (79801,15-55465,37) 24335,78 грн. на виробництві одиниці готової продукції.

З урахуванням всіх розрахованих попередньо показників можна визначити і ефективність впровадження методу через ефективність капітальних витрат з використання загальних показників доходу, собівартості та прибутку.

Дохід від реалізації продукції визначали з урахуванням ринкової ціни лиття до впровадження на рівні 85000 грн./т, а після враховуючи покращення експлуатаційних характеристик можна збільшити на 70%. Нова ціна дорівнюватиме $85000 \times 1,7 = 144500$ грн./т:

$$D = C \times Q \text{ тис. грн.},$$

$$D^1 = 85000 \times 2205 = 187425 \text{ тис. грн.},$$

$$D^2 = 144500 \times 3612 = 521934 \text{ тис. грн.},$$

Загальна собівартість товарної продукції відображена в табл. 3.3:

$$C^1 = 176332,20 \text{ тис. грн.},$$

$$C^2 = 405145,44 \text{ тис. грн.}$$

Тоді, прибуток залежний від обох згаданих показник при врахуванні податку на прибуток (за рівнем 2024 року $P_{\text{Под}} = 18\%$):

$$П = (D - C) \times (100 - P_{\text{Под}}) \text{ тис. грн.},$$

$$\begin{aligned} \Pi^1 &= (187425 - 176332,20) \times 0,82 = 9096,09 \text{ тис. грн.}, \\ \Pi^2 &= (521934 - 405145,44) \times 0,82 = 95766,62 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

Рентабельність виробництва становитиме:

$$\begin{aligned} R &= \frac{\Pi}{C} \times 100 \%, \\ R^1 &= \frac{9096,09}{176332,20} \times 100 = 5,2 \%, \\ R^2 &= \frac{95766,62}{405145,44} \times 100 = 23,6 \%, \end{aligned}$$

Термін окупності капіталовкладень складає:

$$\begin{aligned} T_{ок} &= \frac{KB}{\Delta\Pi} \text{ од часу}, \\ T_{ок} &= \frac{1147,7}{95766,62 - 9096,09} = 0,013 \text{ року.} \end{aligned}$$

Ефективність капіталовкладень:

$$\begin{aligned} E_{KB} &= \frac{1}{T_{ок}}, \\ E_{KB} &= \frac{1}{0,013} = 76,9. \end{aligned}$$

Отже, впровадження методу виготовлення виливків із литими функціональними шарами за допомогою екзотермічної суміші дозволяє збільшити дохід від реалізації продукції за рахунок збільшення об'ємів виробництва та зменшення витрат на сировину і матеріали. В результаті маємо приріст рентабельності на 24,7%. Капіталовкладення необхідні на придбання та встановлення нового обладнання окупляться практично після першого разу реалізації продукції.

Всі розраховані показники зводимо в кінцеву таблицю, що демонструє економічну ефективність впровадження наших пропозицій (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Порівняння основних техніко-економічних показників

Показники	Базовий процес	Запропонований процес	Відхилення	
			абс., нат. од.	відн., %
Випуск продукції, т	2205	3612	+1407	+63,8
Середньодобове виробництво, т/ добу	9	15	+6	+66,7

Годинна продуктивність нагріваючої печі, т/год.	2		-	-
Простої нагріваючої печі, год.	1150	1144	-6	-0,52
Ефективний час роботи нагріваючої печі, год.	2690	2696	+6	+0,22
Виробничі фонди цеху, у т. ч.:				
Основні засоби, тис. грн.	2335,501	2949,931	+614,43	+26,31
Оборотні кошти, тис. грн.	175022,34	2451703,88	+2276681,54	+в 13 раз
Фондовіддача основних засобів, т/тис. грн.	0,94	1,22	+0,28	+29,8
грн./грн.	3,89	32,46	+28,57	+в 7,3 рази
Матеріаломісткість, т/тис. грн.	12,6	1,47	-11,13	-88,3
грн./грн.	0,052	0,039	-0,013	-0,25
Чисельність персоналу, осіб	29	30	+1	+3,4
Продуктивність праці, т/особу	76,03	120,40	+44,37	+58,4
тис. грн. /особу	313,66	3192,22	+2878,56	+ в 9,2 рази
ФОП, тис. грн.	1315,944	1416,6	+100,66	+7,65
Середньомісячна зарплата одного, грн.	13781	14722	+94,1	+6,8
Собівартість, грн./т	79801,15	55465,37	-24336,78	-30,5
Дохід, тис. грн.	187425	521934	+334509	+78,5
Ціна, тис. грн./т	85	144,5	+59,5	+70,0
Прибуток, тис. грн.	9096,09	95766,62	+86670,53	+ в 9,5 рази
Рентабельність, %	5,2	23,6	+18,4	+ в 3,5 рази
Термін окупності, роки	-	0,013	-	-

З таблиці бачимо, що введення нового обладнання та оптимізація процесу отримання виливків із литими функціональними шарами забезпечує не тільки збільшення обсягу виготовлення на 1407 т на рік (на 63,8%), але й призводить до збільшення загальних витрат в 2,3 рази. Але при цьому собівартість кожної тони продукції зменшується з 79801,15 до 55465,37 грн./т. Таке зменшення отримано шляхом економії на матеріалах.

Показники ефективного використання ресурсів підприємства оптимізовані – фондовіддача використання основного устаткування збільшилася на 29,8%, а матеріаломісткість зменшилася на 88,3%.

Збільшення кількості працівників задіяних в процесі на 1 особу пояснюється приростом трудомісткості робіт пов'язаних з приготуванням екзотермічної суміші. Але навіть попри це продуктивність праці збільшилася на 44,37 т/особу.

Прибуток підприємства після сплати податку на прибуток зростає на 86670,53 тис. грн., що забезпечить зростання рентабельності виробництва з 5,2 до 23,6%. Термін окупності капітальних вкладень в реалізацію запропонованих нами процесів склав всього 0,013 року. Тобто по суті вже після першого циклу

виробництво-продаж підприємство може повернути всі фінансові кошти вкладені в упровадження технології у виробництво виливок з литими функціональними шарами.

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

Отримання функціонального шару методом СВС передбачає використання термітних сумішей, які характеризуються підвищеною пожежною та вибухопожежною небезпекою. При виборі безпечних умов проведення технологічних процесів, з використанням термітних сумішей необхідно враховувати особливості їх займання, горіння та гасіння.

Горіння металів, їх сплавів, металовмісних речовин, у тому числі металоорганічних речовин поділяються на 3 класи:

1. клас Д1 - горіння легких металів (алюміній, магній та його сплави, кальцій, титан), умовно «важких» металів (цирконій, ніобій, уран та інших.);
2. клас Д2 - горіння лужних металів (літій, натрій, калій та інших.);
3. клас Д3 - (металоорганічні сполуки: алюмо-, літій-, цинк-органіка, гідриди алюмінію, літію та ін.).

Кожен з перерахованих металів та їх гідридів у звичайному стані є твердою речовиною, крім металоорганічних сполук, що являють собою рідини.

З особливостей металів, які мають пряме відношення до їх вибухонебезпечності та горіння, необхідно відзначити наступні:

1. схильність до самозаймання за нормальних умов (тобто пірофорність);
2. здатність вибухати у стані аерозолі;
3. взаємодія металів, що горять з водою, деякими газовими вогнегасними речовинами: хлоридом (хлорфторвуглеводні), азотом (наприклад, магній).

Здатність до самозаймання мають лужні метали, стружка, металеві порошки, що мають неокислену активну поверхню, гідриди металів, металоорганічних сполук (класи пожеж Д2, Д3).

Найбільш пожежонебезпечними металами, горіння яких відбувається за класом Д1, є легкі метали у вигляді продуктів їхньої переробки: порошоків різної дисперсності, стружки.

Метали у вигляді виробів різної конфігурації (листи, профілі тощо) підпалити практично неможливо, якщо забезпечуються умови переважання відведення тепла над нагріванням.

Гідриди металів займають проміжне положення між металами та органічними сполуками. Пов'язано це з тим, що при розкладанні виділяється водень, що можна розглядати як аналогію процесу виділення горючих газів при піролізі органічних матеріалів, що згорають у газовій фазі.

При цьому гідриди металів значно різняться між собою за своїми фізико-хімічними властивостями, механізмом горіння і займання. Так, гідриди титану, ніобію, танталу тощо є по суті розчинами водню в металі і мають змінний склад з металевим типом зв'язку. Вони горять переважно в тліючому режимі, полум'яне горіння водню практично відсутнє.

У той же час літій-алюміній гідрид, гідриди алюмінію та літію – яскраво виражені індивідуальні сполуки з іонним (для гідридів літію – частково ковалентним) зв'язком, що характеризуються наявністю режимів полум'яного та гетерогенного горіння.

Гіриди алюмінію та гідриди лужних металів виявляють пірофорні властивості, активно взаємодіють з вологою повітря, при невеликому нагріванні активно виділяють водень і внаслідок цього у стані аерозважки утворюють гібридні вибухонебезпечні суміші з повітрям.

При підвищених температурах і горінні можлива взаємодія азоту з найбільш активними гідридами, наприклад, гідридом алюмінію.

Невелике розведення азоту повітрям може призвести до дуже «жорсткого» вибуху аерозолу гідриду алюмінію, тому не для всіх гідридів металів можна використовувати азот як захисну атмосферу. Іноді доводиться використовувати аргон.

Таким чином, характер горіння металів і металовмісних речовин виключає застосування води, водопінних засобів гасіння і ряду газових вогнегасних складів, тому що при контакті цих засобів з металами, що горять, відбувається їх взаємодія, що призводить до розгорання.

Для гасіння пожеж класів Д1, Д2, Д3 застосовуються вогнегасні порошки спеціального призначення. При створенні рецептури таких порошоків враховуються такі фактори:

основна речовина, яка визначає цей склад (від 80 до 95% об.), не повинна містити в молекулі атом кисню (не підтримувати горіння) та не вступати з металом у хімічну реакцію;

вогнегасні порошки спеціального призначення повинні мати певний фракційний склад (як правило, у діапазоні 50-75 мкм);

вогнегасні порошки спеціального призначення не повинні ущільнюватися у процесі зберігання, що досягається включенням до їх складу гідрофобізуючих добавок, а також мати ряд інших експлуатаційних властивостей відповідно до загальноприйнятих технічних вимог.

В даний час найбільш поширені для гасіння пожеж класів Д1, Д2, Д3 вогнегасні порошки спеціального призначення на основі хлоридів лужних металів (KCl (хлорид калію) і NaCl (хлорид натрію)).

Основним принципом досягнення позитивного результату при гасінні металовмісних речовин (за класами Д1, Д2, Д3) є створення за допомогою вогнегасних порошоків спеціального призначення повного захисного покриття вогнища горіння, що перешкоджає доступу кисню повітря в зону горіння. Таке покриття має бути досить щільним, мати необхідну товщину шару порошку по всій поверхні вогнища горіння, що досягається при певній питомій витраті порошку (кг/м).

Гасіння металів і металовмісних речовин має ряд особливостей, властивих кожній групі речовин за класами Д1, Д2, Д3 у тому числі:

- для гасіння металів за класом Д1 вогнегасні порошки спеціального призначення повинні відповідати критеріям, наведеним вище, при цьому основу порошку становить, наприклад, хлорид калію щільністю близько 1 г/см³);

- для гасіння гідридів металів (Д3) застосовується порошки спеціального призначення з характеристиками, аналогічними для порошоків, що застосовується для гасіння класу Д1;

- для металоорганічних речовин, що є рідинами за звичайних умов, вогнегасний порошок спеціального призначення повинен мати щільність, близьку до щільності цих речовин ($\sim 0,7-0,8$ г/см), що забезпечується введенням до складу порошку негорючої добавки з низькою щільністю (перліт, вермікуліт), що також сприяє адсорбції металоорганічних сполук та покращує надійність гасіння.

Проте використання порошкового пожежогасіння теж має недоліки:

- вогнегасні порошки на відміну від води не мають охолоджувального ефекту; надійне гасіння можна досягти при охолодженні металів до температури нижче за температуру їх самозаймання. А температура палаючих металів, як правило, значно вища за температуру самозаймання, тому процес гасіння металів та їх гідридів носить тривалий характер;

- практично всі автомобілі порошкового гасіння мають обмежені технічні можливості і не можуть забезпечити надійне гасіння у приміщеннях об'ємом понад 300-600 м; максимальна висота подачі вогнегасних порошоків спеціального призначення в залежності від типу автомобіля порошкового гасіння та тиску в ємності становить 10-25 метрів, при цьому максимальна відстань подачі порошку по горизонталі становить 4060 метрів, що є в ряді випадків недостатнім для того, щоб забезпечити доставку порошку до місця загоряння.

Висновок: Незважаючи на зазначені недоліки порошкового пожежогасіння найуніверсальнішою, надійною та ефективною вогнегасною речовиною для гасіння металів та металовмісних матеріалів є порошки спеціального призначення. Для гасіння та запобігання загоранням металів і гідридів металів у технологічному обладнанні рекомендується використовувати аргон.

ВИСНОВКИ

1. Досвід відцентрового лиття показує, що для отримання якісних біметалевих виливків необхідно дотримуватися таких вимог: витримувати оптимальні температури основи та металу, що заливається, металевих форм і вставок; не допускати різкого місцевого охолодження виливки зсередини; забарвлювати робочі поверхні виливниць спеціальними покриттями; не допускати биття форми та використання несправного оснащення.
2. Способи поверхневого та об'ємно-локального легування є економічними та ефективними металургійними процесами, що забезпечують одержання біметалевих зносостійких виливків з високими службовими властивостями для роботи в газообразних потоках з підвищеними температурами та в агресивних середовищах. Хімічний склад і властивості основного сплаву виливків при цьому істотно відрізняються від хімічного складу і властивостей легованих об'ємів.
3. Процес отримання литих функціональних шарів методом СВС є нестационарним і для розрахунку розподілу температурного поля в шарі і основі використано метод чисельного інтегрування. Для розрахунку розподілу температурного поля використано ідеальну модель процесу, тобто передача тепла розплавленого металу буде здійснюватися тільки через основу. Результати розрахунку із зміною часу дозволили визначити температуру поверхні основи, яка повинна бути не менше температури її плавлення.
4. Результати розрахунку показали, що без прогрівання приплавлення шару до поверхні пластинки не відбувається. За результатами дослідження, щоб відбулося приплавлення шару, треба прогрівати форму та екзотермічну суміш треба вище 200 °С. При врахуванні теплопередачі форми, розсіювання теплової енергії у навколишнє середовище - ці температури повинні бути значно вище.
5. Економічний аналіз впровадження технології отримання функціональних шарів методом СВС на підприємстві «Steel Work» показав, що використовуючи запропоновану технологію ми економимо на виробничих запасах майже 35%, що при не змінній ціні на виріб дозволяє отримати значне збільшення прибутку, а отже, впровадження технології є економічно вигідним.
6. Дотримання запропонованих заходів безпеки дозволяє безпечно проведення технологічного процесу отримання функціональних шарів методом СВС

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ