

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**РОБОЧА ПРОГРАМА,
методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення
дисципліни «Теорія розливки і кристалізації сталі» для студентів
напряму 6.050401 – металургія чорних металів,
спеціальності 136 – металургія (бакалаврський рівень)**

Друкується за Планом видань навчальної та методичної літератури,
затвердженим Вченою радою НМетАУ
Протокол №1 від 27.01.2017 р.

УДК 669.18

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Теорія розливки і кристалізації сталі» для студентів напряму 6.050401 – металургія чорних металів, спеціальності 136 – металургія (бакалаврський рівень) / Укл.: Є.В. Синегін, Л.С. Молчанов, Д.О. Мусунов, С.В. Журавльова. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – 36 с.

Викладено робочу програму дисципліни «Теорія розливки і кристалізації сталі», наведено рекомендації до самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни, перелік питань для закріплення знань студентами та методичні вказівки для виконання практичних і лабораторних завдань.

Призначені для студентів напряму 6.050401 – металургія чорних металів, спеціальності 136 – металургія (бакалаврський рівень) заочної форми навчання.

Укладачі: Є.В. Синегін, канд. техн. наук, ст. викладач
Л.С. Молчанов, канд. техн. наук, доцент
Д.О. Мусунов, аспірант
С.В. Журавльова, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск Б.М. Бойченко, д-р техн. наук, проф.

Рецензент В.В. Бочка, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)

Підписано до друку 14.08.17. Формат 60×84 1/10. Папір друк. Друк плоский. Облік.-вид. арк. 2,11. Умов. друк. арк. 2,09. Тираж 100 пр. Замовлення № 133.

Національна металургійна академія України
49600, м. Дніпро-5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

1. МЕТА І ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

1.1. Мета вивчення дисципліни

Засвоєння знань та придбання навичок в питаннях теорії розливки та кристалізації сталі при масових способах її виробництва, формування структури та характерних дефектів сталевих зливоків та безперервнолитих заготовок.

1.2. Завдання вивчення дисципліни

Внаслідок вивчення дисципліни студенти повинні:

знати:

- задачі, які вирішуються при розливанні сталі;
- фізико-хімічні властивості рідкої сталі та їх зміну при охолодженні і кристалізації;
- ливарні характеристики металевих розплавів та способи їх визначення;
- гідродинамічні процеси, що супроводжують розливання сталі;
- тепло- і масообмінні процеси що виникають при розливанні сталі;
- механізм формування структури та характерних дефектів сталевих зливоків з спокійної, киплячої та напівспокійної сталі та безперервнолитих заготовок;
- методи зовнішнього динамічного впливу на процес кристалізації;

вміти:

- визначити задачі, які вирішуються при розливці сталі тим чи іншим способом;
- виконати розрахунок температури ліквідус і солідус сталі виходячи з її хімічного складу;
- виконати розрахунки теплообміну між зливком (заготовкою) та виливницею (кристалізатором);
- виконати розрахунки швидкості витікання рідкої сталі з ковша;
- виконати розрахунки швидкості кристалізації зливка (заготовки);
- визначити оптимальну швидкість розливання сталі зверху і сифоном для конкретних умов.

2. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ, ТЕМИ ТА ЇХ ЗМІСТ

2.1. Робоча програма дисципліни

Розподіл навчальних годин

	Усього	Семестр
		9
Усього годин за навчальним планом, у тому числі:	120	120
Аудиторні заняття, з них:	20	20
- лекції	12	12
- лабораторні роботи	4	4
- практичні заняття	4	4
- семінарські заняття	0	0
Самостійна робота, зокрема при:	100	100
Заходи семестрового контролю		Екзамен

2.2. Назви тем та їх зміст

2.2.1. Фізико-хімічні і ливарні властивості сталі та її будова

Сучасні уявлення про будову рідини. Фізико-хімічні властивості рідкої сталі. Класифікація ливарних властивостей розплавів. В'язкість і методи її визначення. Густина і рідкотекучість. Теплопровідність і питомий тепловміст. Усадка сталі, основні показники та методи її розрахунку. Механічні властивості сталі за високих температур.

2.2.2. Гідродинаміка розливки сталі

Витікання струменя з ковша. Примежовий шар струменя і турбулентність. Вплив турбулентності на розпад струменя. Кавітаційні явища в потоках. Розповсюдження занурених струменів. Кавітаційні потоки.

2.2.3. Теплообмін у процесі розливання та формування зливка і заготовки

Процеси нестационарної теплопередачі. Конвекційний теплообмін. Вплив теплового межового шару на розподіл температури в потоці. Вільна конвекція. Теплопередача між виливницею і зливком та кристалізатором і безперервнолитою заготовкою. Закон розподілу температур у зливку і заготовці.

2.2.4. Масопередача при твердненні сталі

Молекулярна дифузія у нерухомому середовищі. Переніс маси у потоці, що рухається. Масопередача від потоків рідину до твердої поверхні. Гідродинамічні основи процесів масопередачі. Міжфазна масопередача. Масопередача від рухомої краплі. Дифузія газів в металах і шлаках.

2.2.5. Кристалізація сталі

Утворення зародків при гомогенній і гетерогенній кристалізації. Відведення теплоти кристалізації. Теорія концентраційного переохолодження. Дендритний ріст кристалів. Перерозподіл домішок при кристалізації. Вплив умов кристалізації на розміри кристалів.

2.2.6. Формування хімічної, фізичної і структурної неоднорідності

Теплофізичні умови формування зон зливків і заготовок. Динаміка руху і подрібнення кристалів. Гравітаційне перемішування металу в двофазній зоні. Теорія утворення хімічної неоднорідності. Ліквіація домішок за розвитку хімічної неоднорідності. Фільтраційний масопереніс ліквіуючих домішок. Вплив швидкості кристалізації на хімічну неоднорідність. Дендритна неоднорідність сталі.

2.2.7. Неметалеві включення

Класифікація неметалевих включень. Формування неметалевих включень при кристалізації сталі. Джерела потрапляння екзогенних неметалевих включень. Оксидні і сульфідні неметалеві включення. Видалення оксидних неметалевих включень зі сталі. Розподіл неметалевих включень в зливках і заготовках.

2.2.8. Методи стороннього впливу на метал у передкристалізаційний період

Кінетика утворення центрів нових фаз. Методи контролю потоків у рідкій фазі заготовки. Електромагнітне перемішування. Безнапірні заглибні стакани. Вібраційна та електрогідроімпульсна обробка. Класифікація інокуляторів та модифікаторів. Вплив нерозчинних часток на процес кристалізації. Вплив структурної подоби на модифікування сплавів. Модифікування мікрохолодильками і комплексними сплавами.

3. ПРАКТИЧНІ РОБОТИ

Практична робота №1

Розрахунок витікання струменя зі сталерозливного ковша

Мета роботи: отримання навичок розрахунку гідродинамічних процесів, що мають місце при розливанні сталі у зливки та машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Загальні положення

Однією з основних задач при розливанні сталі є дотримання температурно-швидкісного режиму. Регулювання швидкості розливання при розливанні у зливки здійснюють шиберним, рідше – стопорним механізмом. Складність процесу полягає у змінненні швидкості вільного витікання струменя в ході розливання внаслідок падіння рівня сталі в сталерозливному ковші. Тому в процесі розливання коефіцієнт гальмування струменя слід поступово зменшувати, підтримуючи незмінну витрату сталі, що забезпечує задану швидкість розливання.

При розливанні сталі на МБЛЗ можливі два варіанти: безстопорна і звичайна розливка. В першому варіанті масова витрата сталі з промковша у кристалізатор регулюється лише зміною рівня металу в промковші, шляхом збільшення або зменшення витрати сталі зі сталерозливного ковша. Швидкість витягування заготовки при цьому має забезпечувати незмінний рівень металу в кристалізаторі. За другим варіантом витрату металу з промковша регулюють стопором або триплитним шиберним затвором.

Важливою задачею розливки є також правильна організація вільного струменя, що витікає зі сталерозливного ковша у виливницю. Розірвання і розбризкування струменя призводить до збільшення його питомої поверхні, що збільшує окисленість сталі та втрати тепла впродовж розливання. При розливанні сталі на МБЛЗ, де зазвичай використовують захисні труби, заглибні стакани, обдув струменя аргоном тощо, ця проблема є менш гострою.

Порядок виконання

З таблиці 3.1 студенти відповідно до свого порядкового номера у групі виписують вихідні дані для розрахунку. Перед кожною формулою має бути назва параметра, що розраховується, а формула має бути спершу записана у

символьному вигляді, з подальшою підстановкою чисельних величин. Результат розрахунку має містити одиниці вимірювання, якщо такі є. Розрахунок виконують у наступній послідовності.

- 1) Об'єм V_m рідкого металу у ковші розраховують виходячи з маси M сталі у ковші і густини ρ_{cm} рідкої сталі (у розрахунку можна прийняти $7,2 \text{ т/м}^3$)*.



Всі параметри, що входять до формул, повинні мати однакову розмірність, якщо протилежне не сказано у поясненні до формули. Неможна в одній формулі використовувати водночас параметри, що містять в своїй розмірності тонни та кілограми, метри та міліметри тощо.

- 2) Рівень H_m металу у ковші розраховують приймаючи, що робочій простір сталерозливного ковша має форму циліндру із заданим співвідношенням висоти до діаметру H/D (див. табл. 3.1). Тоді шуканий рівень металу може бути визначений виходячи зі знайденого вище об'єму V_m та заданого співвідношення H/D .
- 3) Загальний рівень H металу в ковші розраховують з урахуванням знайденого вище рівня H_m металу, шару шлаку товщиною $h_{ш} = 200 \div 300$ мм на дзеркалі металу, футерівки днища ковша товщиною $h_{ф} = 250 \div 400$ мм та виходу стакана за межі кожуха ковша $h_{cm} = 100 \div 200$ мм. Товщину шлакового покриву слід попередньо перерахувати за густиною:

$$h'_{ш} = h_{ш} \cdot \frac{\rho_{ш}}{\rho_{cm}}, \text{ мм}, \quad (3.1)$$

де $\rho_{ш}$ – густина ковшового шлаку (можна прийняти 3 т/м^3).

- 4) Максимальну швидкість V_{max} витікання сталі з повного ковша розраховують за формулою

*Тут і далі формула витікає з формального визначення параметра, який пропонується використати у розрахунку (як то *густина*, що за визначенням є часткою від ділення маси речовини на об'єм в просторі, який вона займає) або для розрахунку шуканого параметра використовують елементарні формули геометрії (як то площа кола). У цьому випадку студент записує формулу власноруч виходячи з власної логіки та використовуючи умовні позначення параметрів, що подані у вихідних даних і поясненні до формули.

Таблиця 3.1

Вихідні дані для розрахунку

№ з/п	Ємність ковша M , т	Марка сталі	Розлив зверху				Розлив сифоном				Безперервна розливка			
			вага зливка $m_{зл}$, т	переріз зливка $a \times b$, м	швидкість V_p , мм/хв	стакан*	вага зливка $m_{зл}$, т	кількість злиwkів $n_{зл}$	переріз зливка $a \times b$, м	швидкість V_p , мм/хв	кількість струmkів $n_{сп}$	переріз заготовки $a \times b$, м	швидкість V_p , м/хв	кількість стаканів на струмок
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	60	10ХСНД	6,0	0,7×0,7	500	1	7,5	4	0,6×0,8	250	4	120×120	1,0	1
2	80	12ХН	8,0	0,8×0,8	550	2	4,0	4	0,6×0,5	200	6	150×150	1,5	1
3	100	17Г	10,0	0,7×1,0	400	3	5,0	4	0,6×0,6	230	6	170×170	1,5	1
4	120	X60	8,0	0,65×0,85	450	1	6,0	4	0,5×0,7	300	4	180×180	1,2	1
5	130	10ХСНД	8,7	0,75×0,85	500	2	8,0	4	0,65×0,85	400	2	180×1000	0,8	2
6	140	X60	11,7	0,8×0,9	600	3	8,0	4	0,7×0,8	450	4	150×150	1,6	1
7	150	17Г	10,0	0,65×1,1	550	1	7,5	6	0,6×0,7	380	6	150×180	1,7	1
8	160	12ХН	12,0	0,85×0,85	600	2	8,0	6	0,6×0,8	350	2	200×1000	0,7	1
9	180	65Г	12,0	0,8×0,9	650	3	6,0	4	0,7×0,7	300	2	250×1200	0,6	2
10	200	12ХН	14,0	0,9×0,9	700	1	10,0	2	0,6×0,95	250	2	220×1800	0,6	2
11	220	ШХ15	13,0	0,8×1,0	500	2	8,0	4	0,7×0,7	280	2	300×1500	0,5	2

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
12	250	09Г2С	14,0	0,8×1,0	550	3	7,6	4	0,6×0,85	350	6	280×300	1,2	1
13	270	15CrMoG	16,0	0,8×1,2	600	1	10,0	4	0,6×0,9	330	6	250×350	1,2	1
14	300	12ХН	16,0	0,8×1,3	650	2	10,0	2	0,6×1,0	380	2	300×800	0,5	2
15	330	10ХБФМ	21,0	0,8×1,5	700	3	12,0	2	0,8×1,0	420	2	350×2000	0,5	2
16	350	A105	16,0	0,6×1,5	600	1	8,0	6	0,7×0,8	300	2	350×2500	0,4	2
17	380	45ХН2МФА	18,0	0,7×1,4	650	2	12,0	4	0,75×1,1	270	2	380×2500	0,4	2
18	400	A105	22,0	0,8×1,5	700	3	12,0	4	0,7×1,2	390	2	350×2500	0,5	2
19	450	25Г2С	23,0	0,8×1,6	1200	1	12,0	2	0,7×1,2	400	2	380×2000	0,6	2
20	310	15CrMoG	20,0	0,7×1,5	700	2	10,0	4	0,8×0,8	350	6	350×300	1,0	1
21	280	ШХ15	16,0	0,9×0,9	550	3	10,0	4	0,7×1,0	300	4	250×350	1,2	1
22	230	70	14,0	0,7×1,2	600	1	8,0	4	0,6×0,8	320	4	300×300	1,0	1
23	170	70	12,0	0,7×1,6	500	2	5,0	6	0,6×0,7	280	4	220×250	1,4	1
24	90	ОСВ	7,0	0,7×0,8	500	3	5,0	6	0,5×0,8	250	4	150×170	1,5	1
25	50	25Г2С	5,0	0,65×0,75	500	1	2,5	6	0,3×0,4	300	2	150×200	1,5	1

* Тип сталерозливного стакану (табл. 3.2): 1 – циліндричний; 2 – конічний, що сходиться; 3 – конідальний

$$V_{\max} = \varphi \sqrt{2gH}, \text{ м/с}, \quad (3.2)$$

де φ – коефіцієнт швидкості, що залежить від геометричного профілю розливного стакана-дозатора (табл. 3.2);
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Таблиця 3.2

Коефіцієнти швидкості і витрати для стаканів-дозаторів різної форми

Тип стакана-дозатора	Коефіцієнти	
	швидкості φ	витрати μ
Круглий отвір в тонкій стінці	0,97	0,62
Циліндричний	0,82	0,82
Конічний, що розходиться $\alpha = 4 \pm 8^\circ$	0,45	0,45
Конічний, що сходиться $\alpha = 13^\circ 24'$, $\alpha = 12^\circ$	0,96	0,95 0,94
Коноідальний	0,98	0,98

- 5) Середній діаметр D ковша розраховують виходячи із заданого співвідношення H/D і знайденого у п.2 рівня металу в ковші H_m .

Подальший розрахунок буде складатися з 3-ох альтернативних способів розливки: у зливки зверху, сифоном та на МБЛЗ. Його мета – визначення діаметру стакана-дозатора, який забезпечить наповнення із заданою швидкістю останнього зливка (при розливанні зверху), піддона (при розливанні сифоном) або постійні швидкість витягування заготовок і рівні металу у промковші і кристалізаторах МБЛЗ.

Розливка у зливки зверху

- 6) Визначають висоту $h_{зл}$ зливка приймаючи, що його форма – прямокутний паралелепіпед розмірами $h \times a \times b$ та масою $m_{зл}$ (див. табл. 3.1). Розрахунок здійснюють по густині $\rho_{ст}$ рідкої сталі.
- 7) Час $\tau_{зл}$ наповнення однієї виливниці розраховують виходячи з висоти $h_{зл}$ зливка та швидкості V_p розливання зверху (див. табл. 3.1).

- 8) Масові витрати G (т/хв) сталі на наповнення однієї виливниці визначають виходячи з маси $m_{зл}$ зливка та тривалості $\tau_{зл}$ його наповнення. Отриманий результат в т/хв. для спрощення подальшого розрахунку слід виразити в кг/с.
- 9) Загальну кількість $n_{зл}$ зливок визначають виходячи з маси M сталі у ковші і ваги $m_{зл}$ зливка. Отриманий результат слід округляти до меншого цілого.
- 10) Рівень H_m^{min} металу у ковші перед наповненням останнього зливка розраховують аналогічно п.2 з тією відмінністю, що маса металу в ковші перед розливанням останнього зливка дорівнює його вазі $m_{зл}$, а величина середнього діаметру D ковша вже розрахована у п.5.
- 11) Загальний рівень H_{min} металу в ковші перед наповненням останнього зливка розраховують аналогічно до п.3 підставляючи H_m^{min} замість H_m .
- 12) Мінімальну швидкість V_{min} розливання перед наповненням останнього зливка розраховують за формулою (3.2), використовуючи H_{min} замість H .
- 13) Діаметр d_{cm} стакан-дозатора визначають з формули для масової витрати сталі при наповненні виливниці

$$G = \mu \rho_{cm} \frac{\pi d_{cm}^2}{4} \sqrt{2gH_{min}}, \text{ кг/с}, \quad (3.3)$$

де μ – коефіцієнт витрати, що залежить від геометричного профілю розливного стакану (див. табл. 3.2);

- 14) Час $\tau_{розл}$ розливки всього металу з ковша вільним струменем (без гальмування) визначають за формулою

$$\tau_{розл} = \frac{2D}{d_{cm}\mu} \sqrt{\frac{H}{2g}}, \text{ с}. \quad (3.4)$$

- 15) Зміну коефіцієнта гальмування $\frac{\mu_i}{\mu}$ в залежності від рівня металу у ковші для забезпечення сталої масової витрати металу і швидкості розливання впродовж розливки визначаємо з формули (3.3) для ковша заповненого на чверть, на половину, на три чверті та повного ковша. За

результатами розрахунку будують графік залежності $\frac{\mu_i}{\mu} = f(H)$.

Приклад графіка наведено на рис. 3.1.

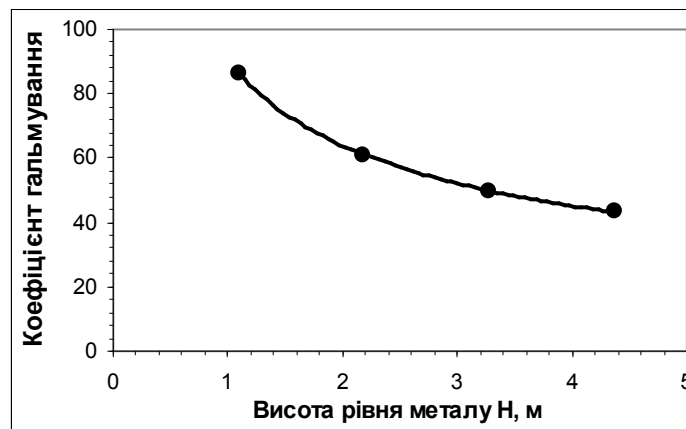


Рисунок 3.1. Приклад графіка залежності коефіцієнта витрати сталі від рівня металу в ковші

- 16) Час $\tau'_{розл}$ розливи всього металу з ковша з гальмуванням струменя розраховують виходячи з маси M сталі та масової витрати G . Після цього слід порівняти, у скільки разів відрізняється тривалість розливання сталі вільним струменем та з гальмуванням.

Розливка у зливки сифоном



При розрахунку розливання сталі у зливки сифоном вага та розміри зливка, а також швидкість розливання інші, ніж при розливанні зверху (див. табл. 3.1).

- 17) Загальну кількість n_n піддонів визначають аналогічно п.9 виходячи з маси M сталі у ковші, ваги $m_{зл}$ зливка та їх кількості $k_{зл}$ на одному піддоні. Слід також врахувати масу металу, який залишається у сифонній проводці (1÷2 % від маси сталі у ковші). Отриманий результат слід округляти до меншого цілого.
- 18) Рівень H_m^{min} металу у ковші перед наповненням останнього піддону визначають аналогічно п.10 з урахуванням кількості $k_{зл}$ злиwkів на одному піддоні.
- 19) Загальний рівень H_{min} металу в ковші перед наповненням останнього піддону розраховують аналогічно п.11.

- 20) Час $\tau_{нид}$ наповнення піддона розраховують аналогічно п.7 для швидкості V_p розливання сифоном (див. табл. 3.1).
- 21) Масову витрату G (т/хв.) сталі при наповнення піддона розраховують виходячи з ваги $m_{зл}$ зливка, їх кількості $k_{зл}$ на одному піддоні та розрахованої вище тривалості $\tau_{нид}$ наповнення піддона. Отриманий результат в т/хв. для спрощення подальшого розрахунку слід виразити в кг/с.
- 22) Мінімальну швидкість V_{min} розливання перед наповненням останнього піддону розраховують аналогічно п.12 за формулою (3.2), використовуючи розрахований у п.19 рівень H_{min} замість H .
- 23) Діаметр d_{cm} стакан-дозатора визначають з формули (3.3) аналогічно п.13. Мінімальний рівень H_{min} металу перед розливанням останнього піддону беруть з п.19 для розливання сифоном.
- 24) Час $\tau_{розл}$ розливки всього металу з ковша вільним струменем (без гальмування) для розрахованого у п.23 діаметра d_{cm} стакан-дозатора визначають за формулою (3.4).
- 25) Аналогічно п.15 розраховуємо зміну коефіцієнта гальмування $\frac{\mu_i}{\mu}$ в залежності від рівня металу у ковші для забезпечення сталої масової витрати металу і швидкості розливання впродовж розливки. За результатами розрахунку будують графік залежності $\mu = f(H)$. Приклад графіка наведено на рис. 3.1.
- 26) Аналогічно п.16 розраховуємо час $\tau'_{розл}$ розливки всього металу з ковша з гальмуванням струменя виходячи з маси M сталі та масової витрати G . Після цього слід порівняти, у скільки разів відрізняється тривалість розливання сталі вільним струменем та з гальмуванням.

Розливка на МБЛЗ

- 27) Масові витрати G металу розраховують як загальну масу рідкої сталі густиною $\rho_{ст}$, що проходить через всі $n_{кр}$ кристалізаторів перерізом $a \times b$ за хвилину при заданій швидкості $V_{вит}$ витягування (див. вихідні дані у табл. 3.1).

- 28) Час $\tau_{розл}$ розливки всього металу з ковша розраховують виходячи з маси M сталі у ковші та її масової витрати G , розрахованої у п.27.
- 29) Діаметр d_{cm} стакан-дозатора сталерозливного ковша визначають з формули (3.3) аналогічно п.23, але замість H_{min} підставляють загальний рівень H металу у ковші, розрахований у п.3.
- 30) Діаметр $d_{нк}$ стаканів-дозаторів промковша визначають за формулою

$$d_{нк} = A \sqrt{\frac{a \times b \cdot V_{вит}}{\sqrt{H_{нк}}}}, \text{ м,} \quad (3.5)$$

де $A = (7,4...7,6) \cdot 10^{-5}$ – коефіцієнт, значення якого залежить від марки сталі;
 a, b – розміри перерізу заготовки, мм;
 $V_{вит}$ – лінійна швидкість витягування, м/хв.;
 $H_{нк}$ – рівень металу в проміжному ковші, м.

Для забезпечення стаціонарного процесу безперервного розливання та ефективного видалення неметалевих включень зі сталі рівень металу в проміжному ковші не повинен зменшуватися нижче 700 мм.

Визначення режиму витікання струменя металу зі сталерозливного ковша при розливанні сталі у зливки зверху

В реальних умовах розливання сталі струмінь рідкого металу внаслідок опору повітря, дії сили тяжіння і внутрішніх сил може деформуватися і навіть розпадатися. При цьому в струмені можуть утворюватися три ділянки: суцільна ділянка стійкого стану струменя; вібруюча ділянка, у якій виникають порушення суцільності; розірвана ділянка, у якій струмінь розпадається на краплі.

Стан струменя при розливанні впливає на захоплення повітря, вторинне окислення сталі, вміст неметалевих включень, схильність до утворення плівок, характер розподілу затопленого струменя у рідкому ядрі безперервнолитої заготовки, розмиваючи фронт кристалізації.

Існує декілька моделей, що описують умови руйнування суцільного струменя металу. За даними Л.А. Клячко при величині числа Вебера $We > 1,63$ від потоку відділяється зореподібний вихор, а руйнування суцільного струменя відбувається за умови $We > 1,875$.

За даними М.І. Волинського критична величина числа Вебера, при якій

відбувається руйнування суцільного струменя рідини, є дещо вищою і складає $5,35 \div 7$. При цьому величина числа Рейнольдса має складати $Re > 10^3$, що вказує на турбулентний режим витікання струменя.

В.Б. Охотським встановлено, що у разі формування на поверхні струменя капілярних хвиль його довжина $L_{кан}$ до місця утворення крапель може бути визначена з формули

$$\frac{L_{кан}}{d_{cm}} = \pi \sqrt{\frac{We}{2}}, \quad (3.6)$$

а при формуванні гравітаційних хвиль з формули

$$\frac{L_{грав}}{d_{cm}} = \sqrt{2\pi Fr}, \quad (3.7)$$

де $Fr = \frac{V_{cmp}^2}{gd_{cmp}}$ – число Фруда.

31) Швидкість V_{cmp} струменя у момент удару об днище виливниці при розливанні зверху розраховують за формулою

$$V_{cmp} = \beta \sqrt{2g(x + \varphi^2 H)}, \text{ м/с}, \quad (3.8)$$

де $\beta = 0,95$ – емпіричний коефіцієнт;

$x = h_{зл} + 0,3$ – відстань від вихідного перерізу стакану-дозатору до днища виливниці (відстань між ковшем та виливницею $250 \div 300$ мм), м.

32) Діаметр d_{cmp} струменя у момент удару об днище виливниці при розливанні зверху розраховують виходячи з закону нерозривності струменя

$$V_{max} \cdot \frac{\pi d_{cm}^2}{4} = V_{cmp} \cdot \frac{\pi d_{cmp}^2}{4} = const, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.9)$$

33) Число Вебера розраховують за формулою

$$We = \frac{\rho_{нов} V_{стп}^2 d_{стп}}{\sigma_{ст}}, \quad (3.10)$$

де $\rho_{нов}$ – густина середовища, у яке витікає струмінь сталі (густину повітря можна прийняти 1,2 кг/м³);

$\sigma_{ст}$ – поверхневий натяг сталі, що може бути визначений за формулою

$$\sigma_{ст} = 1790 - 275([C] - 4,25), \text{ Н/м}, \quad (3.11)$$

де $[C]$ – вміст вуглецю в сталі (див. табл. 3.1 і 3.3), %.

Таблиця 3.3

Хімічний склад деяких марок сталі

Марка сталі	Хімічний склад сталі, %								
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Ti	S	N
70	0,71	0,65	0,27	0,25	0,25	0	0	0,035	0
4320	0,195	0,55	0,25	1,825	0,5	0	0	0,04	0
09Г2С	0,09	1,55	0,38	0,3	0,3	0	0,035	0,004	0,01
10ХБФМ	0,12	0,55	0,27	0	1,1	0	0	0	0
10ХСНД	0,1	0,6	0,9	0,6	0,7	0	0	0,035	0
12ХН	0,12	0,45	0,27	0,65	0,55	0	0	0,035	0
12ХН	0,12	0,45	0,27	0,65	0,55	0	0	0,035	0
15CrMoG	0,15	0,58	0,25	0	0,98	0,5	0	0,03	0
17ГС	0,18	1,2	0,5	0	0	0	0	0,04	0
25Г2С	0,27	1,47	0,7	0,3	0,3	0	0	0,035	0
30ХМА	0,3	0,55	0,27	0,3	0,95	0,2	0	0,03	0
45ХН2МФА	0,46	0,65	0,35	1,55	1	0,25	0	0,02	0
65Г	0,66	0,65	0,27	0,03	0,65	0	0	0,035	0
A105	0,2	1,05	0,35	0,4	0,3	0,12	0	0,05	0
X60	0,185	1,15	0,27	0,3	0,3	0,06	0	0,03	0
OCB	0,245	0,75	0,275	0	0,105	0,225	0	0,03	0
ШХ15	1	0,3	0,27	0,25	1,45	0	0	0,015	0

34) Число Рейнольдса розраховують за формулою

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{cmp}} d_{\text{cmp}}}{\nu_{\text{cm}}}, \quad (3.12)$$

де ν_{cm} – кінематична в'язкість сталі, м²/с. З достатньою для практичних розрахунків точністю можна прийняти $(8,3 \dots 9,7) \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Після розрахунку чисел Вебера і Рейнольдса студенти роблять висновок про режим витікання струменя сталі зі стакана-дозатора сталерозливного ковша.

35) За формулами (3.6) і (3.7) визначають довжину ділянки струменя до початку його розбризкування.

Практична робота №2

Розрахунок тверднення зливка

Мета роботи: отримання навичок розрахунку теплових втрат при розливанні сталі у зливки, температур ліквідус і солідус сталі заданого хімічного складу, тривалості тверднення зливка та безперервно литої заготовки та термічних напружень, що виникають у кірці зливка чи заготовки впродовж тверднення.

Загальні положення

Впродовж транспортування сталерозливного ковша на розливку і аж до кінця розливки метал постійно охолоджується. Температура сталі перед розливанням має забезпечити потрібний перегрів металу над температурою ліквідус, щоб компенсувати всі подальші втрати тепла: у сталерозливному і проміжному ковші впродовж розливки, при переливі зі сталерозливного ковша в проміжній і з промковша в кристалізатор.

Після потрапляння рідкої сталі до виливниці чи кристалізатора на охолоджуваній поверхні починається ріст твердої кірки. Динаміка збільшення її товщини в часі описується законом «квадратного кореню». Константа тверднення у цьому законі залежить лише від фізико-хімічних властивостей сталі (густина, теплопровідність, теплота тверднення) та умов теплообміну між кіркою та навколишнім середовищем.

Внаслідок нерівномірного розподілу температурних полів в кірці злиwkів і заготовок виникають температурні напруження, спричинені різкою зміною густини твердого металу в локальних перегрітих або переохолоджених

ділянках. Якщо величина цих та інших напружень, що виникають в процесі розливання сталі перевищує міцність сталі за даних температур відбувається утворення тріщин.

Розрахунок у практичній роботі складається з чотирьох частин: 1) розрахунок температур ліквідус і солідус; 2) розрахунок витрат тепла сталі випромінюванням при випуску її з агрегату в ківш та на струмені при розливці у виливниці зверху; 3) розрахунок тверднення заготовки*; 4) розрахунок термічних напружень у кінці заготовки.

Порядок виконання

З таблиці 3.1 студенти відповідно до свого порядкового номера у групі виписують вихідні дані для розрахунку. Перед кожною формулою має бути назва параметра, що розраховується, а формула має бути спершу записана у символічному вигляді та містити одиниці вимірювання, якщо такі є. Розрахунок виконують у наступній послідовності.

Температури ліквідус та солідус

1) Температуру ліквідус $t_{лікв}$ сталі розраховують за її хімічним складом

$$t_{лікв} = t_{Fe}^{nl} - \sum a_i \cdot [\%E_i], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.13)$$

де t_{Fe}^{nl} – температура плавлення чистого заліза, $^\circ\text{C}$;

a_i – коефіцієнти, що вказують, на скільки градусів змінюється температура ліквідус при зміні концентрації розчиненого в сталі компонента E_i на 1 % (див. табл. 3.4), $^\circ\text{C}/\%$;

E_i – концентрація компонента E_i в сталі (див. табл. 3.3), %.

2) Аналогічно розраховують температуру солідус сталі.

Розрахунок витрат тепла сталі впродовж розливання

3) Виходячи з температури $t_{лікв}$ ліквідус для заданої марки сталі розраховують температуру $t_{ст.к}$ сталі в ковші перед розливкою. При розливанні сталі в зливки її перегрів в ковші над температурою ліквідус повинен складати 60-80 $^\circ\text{C}$ при розливанні зверху і 80-100 $^\circ\text{C}$ – при розливанні сифоном.

* За методом теплової діаграми проф. І.Д. Семікіна [Румянцев В.Д. Теория тепло- и массообмена: Учеб. пособие. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с., С. 492]

Таблиця 3.4

Коефіцієнти для визначення температур ліквідус і солідус сталі

Компонент	Коефіцієнт a_i для визначення температури		Інтервал використання a_i для визначення $t_{сол}$
	ліквідус	солідус	
C	73	410 180	$[\%C] \leq 0,10$ $0,13 \leq [\%C] \leq 2,14$
S	30	696	$[\%S] \leq 0,25$
P	30	173	$[\%P] \leq 2,8$
Ti	20	18	$[\%Ti] \leq 13$
Si	12	19	$[\%Si] \leq 14,4$
Cu	7	9	$[\%Cu] \leq 6,5$
Ni	3,5	6,5	$[\%Ni] \leq 3,5$
Mn	3	6,5	$[\%Mn] \leq 9,5$
Mo	3	6,5	$[\%Mo] \leq 10$
Al	3	9	$[\%Al] \leq 15$
V	2	6	$[\%V] \leq 10$
Co	1,5	2	$[\%Co] \leq 17,3$
Cr	1	2	$[\%Cr] \leq 2,5$
W	1	1,5	$[\%W] \leq 10$

- 4) Розраховують температуру $t_{ст.к}^{кін}$ сталі в ковші перед спорожненням ковша*. Кількість тепла ΔI , втраченого рідкою сталлю через футерівку ковша, визначають за формулою

$$\Delta I = 2,5D^2 \sqrt{\pi \rho_{\phi} c_{\phi} \lambda_{\phi} \tau'_{розл}} (t_{\phi}^{кін} - kt_{\phi}^{поч}), \text{ Дж}, \quad (3.14)$$

де D – діаметр внутрішнього простору сталерозливного ковша (див. п.5 ПРН№1), м;

ρ_{ϕ} – густина футеровки, кг/м³;

c_{ϕ} – питома теплоємність футеровки, Дж/(кг·К);

* За методикою В.Г. Грузина [Грузин В.Г. Температурный режим литья стали / В.Г. Грузин. – Москва: ГНТИЛ ЧЦМ, 1962. – 351 с., С. 272-277]

λ_{ϕ} – теплопровідність футеровки, Вт/(м·К);

$\tau'_{розл}$ – тривалість розливання сталі (див. п.16 ПР№1), с;

$t_{\phi}^{поч}$ і $t_{\phi}^{кін}$ – відповідно початкова (перед нагрівом) і кінцева (перед прийомом плавки) температура футерівки ковша, °С;

k – коефіцієнт пропорційності, що розраховується за формулою

$$k = 1 - \sqrt{1 + \frac{\tau_{наг}}{\tau'_{розл}}} + \sqrt{\frac{\tau_{наг}}{\tau'_{розл}}}, \quad (3.15)$$

$\tau_{наг}$ – тривалість нагріву футерівки ковша, яка в залежності від ємності ковша зазвичай складає 1÷3 год, с.

Враховуючи, що більшість сучасних сталеплавильних підприємств України мають у технологічному циклі агрегати позапічної обробки, футерівка сталерозливних ковшем виконується з периклазовуглецевих вогнетривів. Для подовження експлуатації футерівки її температура перед прийомом плавки має складати щонайменше 950 °С. Початкова температура $t_{\phi}^{поч}$ футерівки перед прогрівом зазвичай коливається в межах 30÷500 °С в залежності від тривалості простою ковша.

- 5) Падіння температури сталі визначають з рівняння теплового балансу системи «метал-футерівка»

$$\Delta I_{фут} = c_{ст} m_{ст} \Delta t_{м-ф}, \quad (3.16)$$

- 6) Визначаємо втрати тепла на струмені при заповненні виливниці. Для цього спочатку визначають довжину, а з неї площу бічної поверхні струменя. Довжина струменя $h_{стр}$, що витікає з ковша, дорівнює сумі висоти зливка $h_{зл}$ (див. п.6) та висоти x вільного простору між верхньою крайкою виливниці та нижньою крайкою заглибного стакана (див. п.31 ПР №1). Площу $S_{б.н.}$ бічної поверхні струменя розраховують як площу бічної поверхні циліндру, враховуючи також, що при руйнуванні суцільного струменя площа його поверхні збільшується приблизно в 2-4 рази.

- 7) Втрати тепла струменем металу відбувається переважно випромінюванням та меншому ступені вимушеною конвекцією. Перші описуються законом Стефана-Больцмана:

$$q = C_o \varepsilon \left[\left(\frac{T_{ст.к}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (3.17)$$

де $C_o = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon = 0,6$ – ступінь чорноти системи «рідкий метал – повітря»;

$T_{ст.к}$, T_o – температура сталі в ковші перед розливанням і навколишнього повітря відповідно, К.



Велика і мала літера “Т” вказують на температуру у градусах Кельвіна і Цельсія відповідно. У розрахунках процесів термодинаміки і теплообміну зазвичай використовують першу.

- 8) Падіння температури на струмені розраховується з рівняння

$$Q \equiv q S_{б.п.} \tau_{зл} = c_{ст} m_{зл} \Delta t_{ст}, \text{ Вт/м}^2, \quad (3.18)$$

де $\tau_{зл}$ – тривалість наповнення однієї виливниці (див. п.7 ПР №1), с;

$c_{ст} = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ – питома теплоємність рідкої сталі;

$m_{зл}$ – маса зливка при розливанні зверху (див. табл. 3.2), кг.

Розрахунок тверднення зливка та заготовки

- 9) З закону «квадратного кореня» визначають орієнтовну тривалість тверднення зливка при розливанні зверху та сифоном, а також повну тривалість тверднення безперервнолитої заготовки

$$\delta = k \sqrt{\tau}, \text{ мм}, \quad (3.19)$$

де δ – товщина кірки металу, що утворюється за час повного тверднення зливка або заготовки, мм;

k – коефіцієнт тверднення, теоретична величина якого для заданих умов розливання може бути визначена за формулою

$$k = \sqrt{\frac{2\lambda_{me}(t_{ликв} - t_{нов})}{L\rho}}, \text{ мм/хв}^{0,5}, \quad (3.20)$$

τ – час тверднення, хв.;

λ_{me} – теплопровідність твердої кірки, Вт/м·К;

$t_{нов}$ – температура поверхні зливка або заготовки, °С;

L – теплота кристалізації сталі, Дж/кг;

ρ – густина, кг/м³.

Для розрахунків використовують статистичні величини коефіцієнта k , які становлять впродовж:

- наповнення виливниці 14÷17 мм/хв.^{0,5};
- тверднення зливка киплячої сталі 22÷24 мм/хв.^{0,5};
- тверднення зливка спокійної сталі 25÷27 мм/хв.^{0,5}.

Величини коефіцієнта k при розливанні сталі на МБЛЗ наведено у таблиці 3.5. В кристалізаторі величина коефіцієнта k зазвичай коливається в межах 30÷37 мм/хв.^{0,5}.

Таблиця 3.5

Коефіцієнти тверднення при розливанні на МБЛЗ заготовок різного перерізу

Марка сталі	Заготовка		
	сорт	блном	сляб
високовуглецева	31	28	25
середньовуглецева	32	29	26
низьковуглецева	33	30	27

10) Виходячи зі швидкості V_p розливання з формули (3.19) визначають товщину δ твердої кірки на виході з кристалізатора з робочою довжиною l 1 м. Отриману величину порівнюють із критичною товщиною $\delta_{кр}$, яка становить:

- для сортових заготовок – 15÷18 мм;
- для блюмів – 25÷30 мм;
- для слябів – 25÷35 мм.

Якщо фактична товщина δ менша за критичну $\delta_{кр}$, то кірка не витримує зовнішніх та внутрішніх напружень і відбувається прорив металу під

кристалізатором. У цьому випадку студент розраховує раціональну швидкість $V_{рац}$ розливання, що забезпечить формування кірки із товщиною, більшою за критичну.

11) Виходячи з швидкості V_p розливання та тривалості τ тверднення безперервнолитої заготовки (див. п.9) розраховують металургійну довжину МБЛЗ (довжину твердого ядра заготовки).

Відведення тепла від поверхні зливка у навколишнє середовище впродовж усього процесу тверднення відбувається теплопровідністю через стінку чавунної виливниці товщиною $\delta_{вил} \approx 200$ мм і потім природньою конвекцією та випромінюванням у навколишнє середовище. Параметр, що характеризує теплові опори при передачі тепла через багат шарові стінки, називають коефіцієнтом теплопередачі K .

Далі для спрощення розрахунку тверднення зливка зроблено низку допущень, яких варто уникати при точних розрахунках тверднення зливка.

12) Сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від стінки виливниці у навколишнє середовище розраховують за формулами Нуссельта (1-ий доданок) і Стефана-Больцмана (2-ий доданок)

$$\alpha_{\Sigma} \equiv \alpha_k + \alpha_{випр} = 2,56 \sqrt[4]{t_{вил} - t_o} + \frac{C_o \varepsilon_{чав} \left[\left(\frac{T_{вил}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right]}{t_{вил} - t_o}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3.21)$$

де α_k і $\alpha_{випр}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією і випромінюванням відповідно, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$t_{вил}$ – температура зовнішньої поверхні виливниці (приймаємо середню температуру поверхні впродовж тверднення 400, °С).

13) Коефіцієнт теплопередачі розраховують виходячи з сумарного коефіцієнта тепловіддачі α_{Σ} та теплового опору $\frac{\delta_{вил}}{\lambda_{чав}}$ виливниці за формулою

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Sigma}} + \frac{\delta_{вил}}{\lambda_{чав}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3.22)$$

де $\lambda_{\text{чав}} = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – коефіцієнт теплопровідності чавуну.

14) Визначають критерій Біо для зливка при розливанні зверху

$$Bi = \frac{Kl}{\lambda_{\text{ст}}}, \quad (3.23)$$

де l – характерний розмір зливка (половина товщини прямокутного або радіус круглого зливка), м;

$\lambda_{\text{ст}} = 31 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – коефіцієнт теплопровідності сталі.

15) Визначають температуру поверхні зливка наприкінці кристалізації

$$t_{\text{нов.кін}} = \frac{t_{\text{лікв}} + \frac{Bi}{K_2} t_{\text{навк}}}{1 + \frac{Bi}{K_2}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.24)$$

де K_2 – коефіцієнт усереднення щільності теплового потоку у тілі в заданий момент часу (див. додаток А);

$t_{\text{навк}}$ – температура навколишнього середовища, приймаємо $660 \text{ } ^\circ\text{C}$.

16) Визначають кінцеву середньомасову температуру зливка наприкінці кристалізації

$$\bar{t}_{\text{тв.кін}} = t_{\text{лікв}} - \frac{t_{\text{лікв}} - t_{\text{нов}}}{K_3}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.25)$$

де K_3 – коефіцієнт усереднення температур у тілі в заданий момент часу (див. додаток А).

17) За законом Ньютона-Ріхмана визначають щільність теплового потоку на початку та наприкінці кристалізації

$$q_{\text{нов.поч}} = K(t_{\text{лікв}} - t_0), \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (3.26)$$

$$q_{\text{нов.кін}} = K(t_{\text{нов.кін}} - t_0), \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (3.27)$$

18) Визначають середню величину щільності теплового потоку впродовж кристалізації

$$\bar{q} = \frac{q_{нов.поч} - q_{нов.кін}}{\ln \frac{q_{нов.поч}}{q_{нов.кін}}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (3.28)$$

19) Загальна тривалість тверднення зливка

$$\tau_{мс} = \frac{l\rho_{мс}(c_{рід}t_{лікв} + L - c_{мс}\bar{t}_{мс.кін})}{\bar{q}K_1}, \text{ хв}, \quad (3.29)$$

де K_1 – коефіцієнт масового навантаження, що залежить від форми тіла: для пластини – 1, для циліндру – 2, для кулі – 3.

Для побудови температурної і теплової діаграм необхідно виконати розрахунок тривалості тверднення різних відносних часток ω твердої фази у зливку. Розрахунок виконується у наступній послідовності.

20) Для заданої масової частки ω твердої фази у зливку визначаємо температуру поверхні зливка

$$t_{нов}(\omega) = \frac{t_{лікв} + \frac{Bi}{K_2} [1 - (1 - \omega)^2] t_{навк}}{1 + \frac{Bi}{K_2} [1 - (1 - \omega)^2]}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.30)$$

де ω – масова частка твердої фази у зливку у долях одиниці.

21) Виходячи з розрахованої у попередньому пункті температури поверхні зливка за формулою (3.28) визначають щільність теплового потоку $q_{нов}(\omega)$ для заданої масової частки ω .

22) Визначають фіктивну різницю температур

$$\Delta t_{фік}(\omega) = \frac{q_{нов}l}{K_2\lambda_{мс}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.31)$$

23) Розраховують середньомасову температуру зливка

$$\bar{t}_{мс}(\omega) = t_{лікв} + \Delta t_{фік} (1 - \omega)^2 - \frac{\Delta t_{фік}}{K_3} \cdot \frac{1 - (1 - \omega)^{K_1+2}}{1 - (1 - \omega)^{K_1}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.32)$$

- 24) За формулою (3.28) виходячи з щільності теплового потоку $q_{нов}(\omega)$ (див. п.21) визначають середню величину щільності теплового потоку $\bar{q}(\omega)$.
- 25) Тривалість формування твердої фази ω .

$$\tau_{мс} = \frac{l\rho_{мс} \left[1 - (1 - \omega)^{K_1} \left(c_{pid} t_{ликв} + L - c_{мс} \bar{t}_{мс}(\omega) \right) \right]}{\bar{q}(\omega) K_1}, \text{ хв.} \quad (3.33)$$

Результати розрахунку динаміки тверднення зливка за п.п.20-25 для різної масової частки ω твердої фази у зливку заносять в таблицю 3.6 та будують графіки зміни в часі частки твердої фази $\omega = f(\tau)$, середньомасової та поверхневої температур зливка $\bar{t}_{мс}, t_{нов} = f(\tau)$ та щільності теплового потоку $\bar{q} = f(\tau)$.

Таблиця 3.6

Результати розрахунку динаміки тверднення зливка

$\omega, \%$	$t_{нов}, ^\circ\text{C}$	$q_{нов}, \text{Вт/м}^2$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$t_{мс}, ^\circ\text{C}$	$q_{cp}, \text{Вт/м}^2$	$\tau, \text{год}$
20						
40						
60						
80						
100						

Розрахунок термічних напружень в кінці зливка

Впродовж кристалізації сталевих зливків і заготовок у кінці неминуче виникають механічні напруження. Їх причиною є два фактори: 1) поліморфні перетворення твердого розчину вуглецю в залізі та 2) градієнт температур по товщині кірки. Обидва процеси супроводжуються локальною зміною об'єму твердого металу, що і викликає утворення напружень.

- 26) Для різної масової частки ω твердої фази в зливку (див. табл. 3.6) розраховують модуль пружності E за температур тверднення

$$E = 30825 + 4292,4[C] - 14400[C]^2 + 2052,6[Si] - 528,9[Mn] - 1200[P] + 17400[S] - 22,56t + 1,379 \cdot 10^{-3} t^2, \text{ Па,} \quad (3.34)$$

де t – середнє арифметичне температур ліквідус $t_{лікв}$ (див. п.1) і поверхні заготовки $t_{нов}(\omega)$ (див. табл. 3.6) для кожної масової частки ω твердої фази

$$t = \frac{t_{лікв} - t_{нов}(\omega)}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.35)$$

27) Розраховують коефіцієнт усадки сталі при температурах тверднення

$$\alpha = 2,5 - 0,354[C], \text{ } \%. \quad (3.36)$$

28) Термічні напруження розраховують за рівнянням

$$\sigma_m = A\Delta t \frac{\alpha E \mu}{1 - \mu^2}, \text{ } \text{Па}, \quad (3.37)$$

де A – коефіцієнт, що визначається характером розподілу температури в перерізі кірки зливка: за лінійного розподілу $A=0,5$; за параболічного розподілу з показником ступеня $n > 1$ (випукла крива) $A=0,33$; а при $n < 1$ (вигнута крива) $A=0,66$;

$\Delta t = t_l - t_{нов}(\omega)$ – перепад температур в кірці між її внутрішніми (на межі з рідким металом) і зовнішніми (біля стінки виливниці або кристалізатора) шарами, $^\circ\text{C}$;

α – коефіцієнт усадки сталі при температурах тверднення, $1/^\circ\text{C}$;

E – модуль пружності сталі, Па;

μ – коефіцієнт Пуассона, що за даними В.А. Єфімова для затверділої кірки зливка дорівнює 0,4.

При наявності зовнішнього навантаження $\sigma_{зов}$ на кірку зливка або заготовки (феростатичний тиск, тягнучі зусилля та ін.) сумарні напруження кірки σ_Σ можна представити

$$\sigma_\Sigma = \sigma_T + \sigma_{зов}. \quad (3.38)$$

Умовами розриву кірки (утворення гарячих тріщин) є

$$\sigma_\Sigma > \sigma_\epsilon, \quad (3.39)$$

де σ_ϵ – межа міцності сталі при температурах кристалізації ($t > 1445^\circ\text{C}$).

29) Аналогічно рівнянню (3.34) розраховують величину σ_ϵ

$$\sigma_\epsilon = 40,93 + 0,653[C] - 7,742[C]^2 - 0,9[Si] + 0,176[Mn] - 7,822[P] - 1,284[S] - 2,645 \cdot 10^{-2}t + 1,76 \cdot 10^{-7}t^2, \text{ МПа.} \quad (3.40)$$

30) Результати розрахунку за п.п.26,28,29 для різної масової частки ω твердої фази в зливку заносять в таблицю 3.7 та будують графік залежностей $\sigma_\epsilon = f(\omega)$ і $\sigma_m = f(\omega)$. Обидві лінії мають бути зображені на одному графіку для наочного порівняння величини термічних напружень і межі міцності зливка на різних етапах його тверднення.

Таблиця 3.7

Результати розрахунку термічних напружень в кінці зливка

$\omega, \%$	E	t	Δt	σ_m	σ_ϵ
20					
40					
60					
80					
100					

31) За характером розташування кривих на графіку роблять висновок стосовно вірогідності утворення гарячих тріщин у кінці зливка впродовж тверднення.

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

Моделювання теплових процесів тверднення безперервнолитої заготовки

Мета роботи: ознайомитись з методикою вимірювання і розрахунку основних теплових параметрів, що мають місце при твердненні безперервнолитої заготовки та оцінити вплив режимів охолодження на кінетику тверднення.

Матеріали та обладнання: електрична пічка, дві металеві каструльки різного діаметру, вода, стеарин, ртутний термометр, лійка, експериментальна установка, повітря, витяжна шафа, годинник, фотокамера зі штативом, пилка, калькулятор або ПК.

Загальні положення

Охолодження заготовки на МБЛЗ умовно поділяють на три етапи:

- *первинне* в кристалізаторі;
- *вторинне* у зоні вторинного охолодження (ЗВО);

- третинне або остаточне на холодильнику, що крокує.

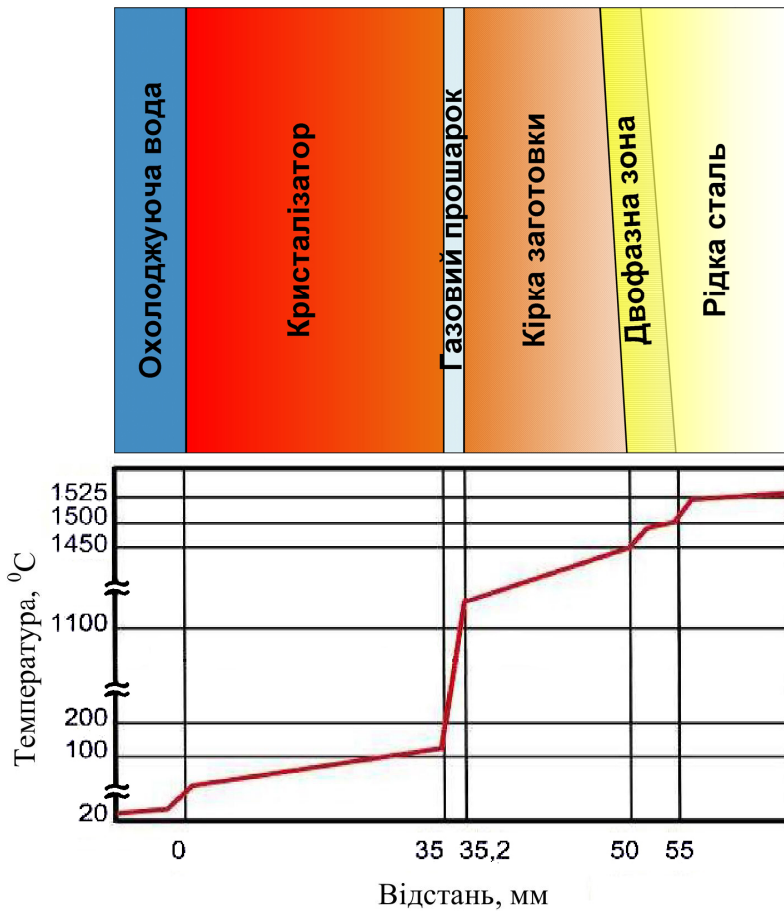


Рисунок 4.1. Зміна температури при охолодженні заготовки в кристалізаторі МБЛЗ

За час перебування в кристалізаторі від металу відводиться 15-30 % його тепловмісту. Залежно від умов розливання тепло від кірки заготовки у навколишнє середовище може відводитися всіма трьома способами теплопередачі. За ідеальних умов, коли заготовка повністю контактує з поверхнею кристалізатора, тепло передається теплопровідністю до гільзи кристалізатора і далі вимушеною конвекцією до охолоджуючої води.

Якщо ж внаслідок усадки металу та низки технологічних факторів

між кристалізатором і заготовкою утворюється газовий прошарок, то можливі два варіанти. За першим газовий прошарок заповнюється рідкою шлакоутворюючою сумішшю (ШУС), яка стікає у прошарок з області меніску. У цьому випадку тепло природньою конвекцією передається від кірки до рідкої ШУС, потім теплопровідністю у шарі ШУС і знову природньою конвекцією до кристалізатора.

У випадку неякісної ШУС, невільного вибору її хімічного складу, недостатньої чи нерівномірної її подачі на дзеркало металу в кристалізаторі прошарок між кристалізатором і заготовкою залишається заповненим повітрям, теплопровідність якого на 2 порядки менша, ніж у рідкої ШУС. Таким чином тепло від заготовки до кристалізатора передається двома способами: 1) випромінюванням і 2) так само як через ШУС (природньою конвекцією до повітря – теплопровідністю у повітряному прошарку – природньою конвекцією

до кристалізатора.

Перелічені вище процеси призводять до виникнення термічних опорів, що зменшують тепловий потік від рідкого металу у навколишнє середовище. Додатковим чинником, що зменшує тепловий потік від рідкого розплаву, є термічний опір зростаючої кірки заготовки.

У лабораторній роботі пропонується дослідити зміну теплового потоку та інших показників впродовж тверднення стеаринової заготовки.

Методика проведення експерименту

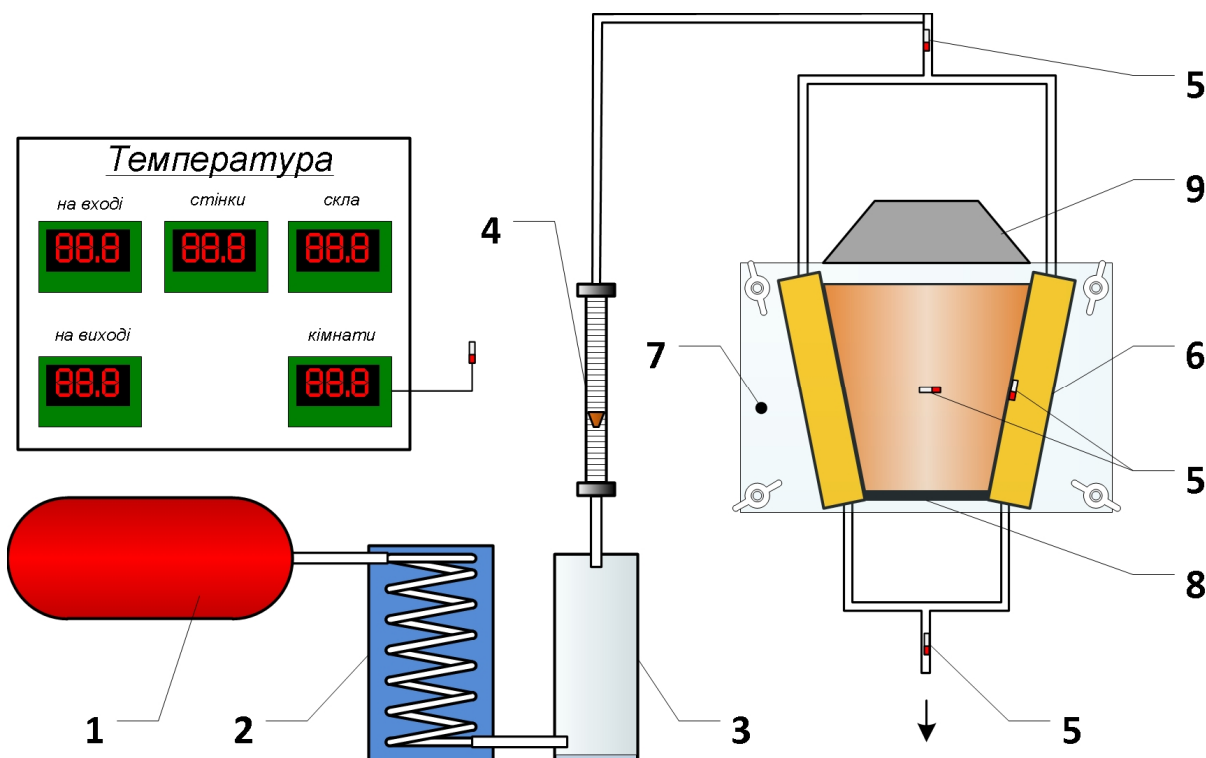


Рисунок 4.2. Схема експериментальної установки: 1 – компресор потужністю 1,5 кВт та продуктивністю не менше 200 л/хв; 2 – охолоджувач повітря; 3 – конденсатор для збирання вологи; 4 – поплавковий ротаметр типу 2,5Г; 5 – сенсори електронних термометрів; 6 – мідні холодильники; 7 – скляні пластини; 8 – гумове днище; 9 – абажур з лампою на 12 Вт для підігріву верхньої частини зразка

Перед початком проведення роботи необхідно виконати наступні приготування. Подрібнити, а краще натерти стеарин. Скип'ятити воду у більшій каструльці, засипати подрібнений стеарин у меншу каструльку та нагрівати її на водяній банні. В цей навчальний майстер та викладач мають перевірити щільність з'єднання трубок, роботу компресора 1 та витяжної шафи, лампи та електронних термометрів. Викладач має виставити мідні

холодильники 6 під заданим кутом (обирається на власний розсуд в межах 2,3-6° до вертикалі) та затягнути гвинти. Після перевірки всіх вузлів установки перед нею на штативі встановлюють фотокамеру.

Експериментальна установка складається з двох порожнистих мідних холодильників 6, прямокутного перерізу із розмірами внутрішнього простору 26×31 мм. Разом з двома скляними пластинами 7 та гумовим днищем 8 вони утворюють робочий простір установки. До внутрішньої поверхні одного з холодильників та до зовнішньої поверхні скла прикріплено сенсори 5 електронних термометрів, які вимірюють температуру поверхні мідного холодильника та скла відповідно. Інші 2 сенсори 5 встановлено у силіконових трубках на вході та виході з мідних холодильників 6.

З позиції теорії подоби у якості охолоджувача було обрано повітря, яке вдувається в систему компресором 1. Для підвищення ефективності охолодження зразка повітря перед входом у холодильники 6 пропускають через охолоджувач 2. Для збирання надмірної вологи з повітря за охолоджувачем 2 встановлено конденсатор 3. Об'ємну витрату повітря вимірюють поплавковим ротаметром 4 типу 2,5Г.

Навчальний майстер вмикає компресор і електронні термометри, після чого разом із викладачем обережно заливають розплавлений стеарин через воронку між скляних пластин в установку. Перегрів стеарину перед заливкою не має перевищувати 4 °С (тобто не більше 59÷60 °С). Температуру розплавленого стеарину вимірюють ртутним термометром. При перегріві його охолоджують додаванням дрібних порцій стеаринової стружки, розмішуючи при цьому великим шматком стеарину.

Студенти фіксують показники всіх термометрів та витрату повітря на охолодження перед заливкою стеарину і далі кожні 5 хв. впродовж експерименту до повного затвердіння зразка (визначають візуально). Перші 5 хвилин показники фіксуються щохвилини. Температуру повітря у приміщенні вимірюють ртутним термометром. Кожний замір супроводжується фотозйомкою. Результати замірів вносять в робочу форму (додаток Б).

Після повного затвердіння зразка навчальний майстер вимикає електронні термометри, компресор та лампу, а викладач обережно розбирає установки і виймає з неї зразок. Отриманий зразок розпилюється уздовж вертикальної площини паралельної ширшим граням та замальовується.

Методика обробки експериментальних даних

Обробку експериментальних даних виконують у наступній послідовності. Результати обробки експериментальних даних заносять у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

Результати обробки експериментальних даних

Час, хв	Температура з поправкою, °С					Витрата повітря, л/хв.	Щільність теплового потоку, Вт/м ²		Товщина кірки, мм
	на вході	стінки	на виході	скло	кімната		$q_{хол}$	$q_{ск}$	

- 1) Оскільки всі електронні термометри мають інструментальну похибку, визначають істинні температури повітря та скла впродовж експерименту

$$t_i = a_1 \cdot t_i' + a_o, \text{ °С}, \quad (4.1)$$

де t_i і t_i' – відповідно істина та виміряна термометром температури, °С;
 a_o і a_1 – поправні коефіцієнти (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Поправні коефіцієнти для електронних термометрів

Позиція термометра	a_1	a_o
На вході	0,8548	3,75
Стінки холодильника	0,8672	3,74
На виході	1,0101	-0,27
Скляної пластини	1,0245	-0,26

- 2) Виходячи з того, що температура плавлення стеарину складає приблизно 55,6 °С, визначають його перегрів Δt над температурою плавлення.
- 3) Визначають об'ємну витрату повітря $V_{нов}$ впродовж експерименту. Маркування ротаметра 2,5Г означає, що позначка на його шкалі 100% відповідає витраті повітря у 2,5 м³/год.
- 4) Для кожного заміру визначають час τ від початку експерименту.

- 5) За формулою Нуссельта визначають коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від поверхні скляної пластини у навколишнє середовище

$$\alpha_{ск} = 2,564 \sqrt[4]{t_{ск} - t_{навк}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (4.2)$$

- 6) Визначають щільність теплового потоку від парафіну у навколишнє середовище

$$q_{ск} = \frac{t_{ск} - t_{навк}}{\frac{1}{\alpha_{ск}} + \frac{\delta_{ск}}{\lambda_{ск}}}, \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (4.3)$$

де $\delta_{ск}$ – товщина скляної пластини, яка складає 0,01 м;

$\lambda_{ск}$ – теплопровідність органічного скла, яка становить 0,25 Вт/(м·К).

Тепловий потік від зразка до охолоджуючого повітря визначається з закону збереження енергії: кількість тепла $Q_{зр}$, яке передане від зразка через стінку мідного холодильника до повітря, дорівнює зміні тепловмісту $\Delta I_{нов}$ повітря за одиницю часу τ

$$Q_{зр} = \frac{\Delta I_{нов}}{\tau}, \text{ Вт}. \quad (4.4)$$

Зміна тепловмісту повітря визначається за формулою

$$\Delta I_{нов} = c_{нов} v_{нов} (t_{вих} - t_{вх}), \text{ Вт}, \quad (4.5)$$

де $c_{нов}$ – питома теплоємність повітря, яку для температур експерименту можна прийняти 1320 Дж/(м³·°С);

$v_{нов}$ – об'єм повітря, м³;

$t_{вих}$ і $t_{вх}$ – температура повітря на виході та на вході в холодильник, °С.

- 7) Поєднавши формули (4.4) і (4.5) отримуємо формулу для розрахунку шуканої щільності теплового потоку впродовж експерименту

$$q_{хол} = \frac{c_{нов} V_{нов} (t_{вих} - t_{вх})}{S_{хол}}, \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (4.6)$$

де $S_{хол}$ – площа поверхні мідного холодильника, що контактує зі зразком, м²;

$V_{нов}$ – об'ємна витрата повітря, м³/с.



При розрахунку слід враховувати, що ротаметр вимірює витрату повітря, що поступає у обидва холодильники.

- 8) За зробленими фото визначають товщину кірки $\delta_{кір}$ заготовки у середній по висоті частині зразка і заносять заміри у таблицю 4.1.
- 9) За результатами обробки експериментальних даних будують 4 графіки:
 - зміни всіх вимірюваних температур з урахуванням поправки впродовж експерименту $t_{вих}, t_{вх}, t_{ст}, t_{ск}, t_{навк} = f(\tau)$;
 - зміни щільності теплового потоку через мідний холодильник і скляну пластину впродовж експерименту $q_{хол}, q_{ск} = f(\tau)$;
 - зміни в часі товщини кірки $\delta_{кір} = f(\tau)$;
 - залежність щільності теплового потоку через мідний холодильник від товщини кірки $q_{хол} = f(\delta_{кір})$.
- 10) Замалювати внутрішню структуру зразка.
- 11) У якості додаткового (необов'язкового) завдання підвищеної складності пропонується визначити середню по висоті мідного холодильника товщину кірки заготовки впродовж експерименту, побудувати графік її зміни в часі та визначити рівняння, що описує цю залежність.

Правила техніки безпеки при виконанні роботи

При виконанні роботи необхідно дотримуватися наступних правил:

- 1) розливання стеарину в установку слід виконувати на відстані не менше 1,5 м від включених нагрівальних приладів;
- 2) через суттєве випарювання стеарину експеримент слід проводити лише у приміщенні, обладнаному хорошою вентиляцією;
- 3) заборонено торкатися до електричних дротів і інших струмопровідних частин, ввімкнення і вимкнення рубильників нагрівальних приладів та іншого устаткування здійснює керівник роботи або навчальний майстер;
- 4) заборонено торкатися до устаткування і апаратури, на яких не проводиться лабораторна робота;
- 5) підтримувати чистоту робочого місця і не відволікатися на сторонні справи.

Додаток А

Коефіцієнти усереднення щільності теплового потоку K_2 та температур у тілі K_3

Vi	K_2		K_3	
	Пластина	Циліндр	Пластина	Циліндр
0	2	2	3	2
0,1	1,984	1,976	2,99	1,985
0,2	1,969	1,952	2,981	1,981
0,4	1,941	1,908	2,965	1,968
0,6	1,916	1,869	2,95	1,958
0,8	1,895	1,832	2,937	1,942
1	1,875	1,8	2,926	1,933
1,5	1,834	1,731	2,902	1,912
2	1,803	1,676	2,884	1,896
3	1,757	1,591	2,857	1,866
4	1,726	1,533	2,84	1,848
5	1,704	1,492	2,827	1,835
6	1,687	1,46	2,817	1,826
7	1,674	1,436	2,81	1,818
8	1,663	1,417	2,804	1,814
9	1,655	1,4	2,799	1,807
10	1,648	1,387	2,795	1,803
15	1,625	1,344	2,782	1,789
20	1,612	1,321	2,775	1,782
30	1,599	1,3	2,768	1,775
40	1,592	1,29	2,764	1,771
50	1,588	1,28	2,762	1,769
60	1,585	1,273	2,76	1,767
80	1,582	1,267	2,758	1,765
100	1,58	1,263	2,757	1,764
∞	1,5708	1,25	2,752	1,762

