

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



**РОБОЧА ПРОГРАМА,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни
«Технологічні особливості виробництва особливо чистих кольорових
металів»
для студентів заочної форми навчання
за освітньо-професійною програмою
«Технології та обладнання виробництва металів і сплавів»
підготовки здобувачів вищої освіти
за першим (бакалаврським) рівнем
зі спеціальності 136 «Металургія»
(Профіль: *МЕ06 «Металургія кольорових металів»*)**

УДК 669.331

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Технологічні особливості виробництва особливо чистих кольорових металів» для студентів заочної форми навчання за освітньо-професійною програмою «Технології та обладнання виробництва металів і сплавів» підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем зі спеціальності 136 «Металургія» (Профіль: *МЕ06 «Металургія кольорових металів»*) / Укл.: Г.А. Поляков, С.М. Підгорний, Г.М. Трегубенко, В.С. Ігнат'єв, Ю.О. Бубликов – Дніпро: НМетАУ, 2016. – 17с.

Наведені робоча програма дисципліни з методичними вказівками, рекомендованою літературою і питаннями для самоперевірки за окремими темами, а також індивідуальне домашнє завдання.

Призначена для студентів заочної форми навчання за освітньо-професійною програмою «Технології та обладнання виробництва металів і сплавів» підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем зі спеціальності 136 «Металургія» (Профіль: *МЕ06 «Металургія кольорових металів»*).

Укладачі: Г.А. Поляков, ст. викладач
С.М. Підгорний, ст. викладач
Г.М. Трегубенко, д-р техн. наук, проф.
В.С. Ігнат'єв, канд. техн. наук, проф.
Ю.О. Бубликов, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск М.І. Гасик, д-р техн. наук, проф.

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

Підписано до друку _____. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. _____. Умов. друк. арк. _____. Тираж 100 пр. Замовлення № _____

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

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

За навчальним планом дисципліна «Металургія особливо чистих металів» вивчається студентами-заочниками на п'ятому курсі.

Мета вивчення дисципліни – засвоювання знань та придбання навичок, необхідних для проектування та експлуатації цехів кольорової металургії, спеціалізованих на виробництві особливо чистих металів.

Аудиторні навчальні заняття для студентів заочної форми навчання складають – 8 годин лекцій та 4 години лабораторних робіт і 60 годин на самостійну роботу. Студенти заочної форми навчання виконують індивідуальне домашнє завдання.

Навчальні заняття з дисципліни складаються з лекцій, лабораторних робіт, практичних занять, самостійної роботи з літературою, виконання індивідуального завдання та складання екзамену.

Самостійне вивчення дисципліни рекомендується проводити в наступній послідовності:

- 1) ознайомитися зі змістом теми, що вивчається, і методичними вказівками до неї;
- 2) вивчити за рекомендованою літературою матеріал, що відноситься до даної теми, та скласти конспект з пояснювальними схемами і графіками;
- 3) після засвоєння теми відповісти на питання для самоперевірки.

Основним видом занять при вивченні вказаної дисципліни студентами заочної форми навчання є самостійна робота з літературою.

Рекомендована література:

1. Колобов Г.О. Теоретичні основи рафінування кольорових металів: Підручник для студ. ВНЗ / Г.О. Колобов, І.Ф. Червоний; за заг. ред. Г. О. Колобова. – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 130 с.
2. Беляев А.И. Физико-химические основы очистки металлов и полупроводниковых материалов. - М.: Металлургия, 1973. – 221 с.
3. Колобов Г. А., Давыдов С. И., Печерица К. А. Рафинирование цветных металлов. Физико-химические и технологические основы: монографія / Г.А. Колобов, С.И. Давыдов, К.А. Печерица. – Запорожье: Просвіта, 2012. – 160 с.

4. Беляев А.И., Жемчужина Е.А., Фирсанова П.А. *Металлургия чистых металлов и элементарных полупроводников.* – М.: *Металлургия*, 1969. – 503 с.

Всі незрозумілі питання необхідно записати в конспект за темою для їх з'ясування з викладачем під час консультацій і аудиторних занять.

Індивідуальні завдання потрібно виконувати після засвоєння відповідних тем.

2 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ТЕМ

Тема 2.1 Теоретичні основи рафінування металів і сплавів (4 години лекцій та самостійна робота)

2.1.1 Програма

Вступ.

Властивості і значення особливо чистих металів у техніці. Поняття про чистоту металів. Напівпровідникова, ядерна та фізична чистота металів. Вплив чистоти металів на їх властивості. Галузі застосування особливо чистих металів. Класи чистоти речовини і методи їх маркування. Позначення ступенів чистоти металів.

Теоретичні основи одержання особливо чистих металів. Класифікація рафінувальних процесів. Коефіцієнти розділення і розподілення. Кристалізація з розчинів. Кристалізація з розплавів. Метод витягування з розплаву. Зонна перекристалізація. Ректифікація. Перегонка за допомогою транспортних хімічних реакцій. Іодідне рафінування. Возгонка (сублімація) і дистиляція. Амальгамний електроліз. Електролітичне рафінування. Електропереніс. Розділення дифузією та термодифузією. Високовольтний електроліз. Очищення від газів і летючих домішок методами плавки у вакуумі (ВП, ВДП, ЕПП).

2.1.2 Література

[1], С.4-130; [2], С.8-220; [3], С. 6-127.

2.1.3 Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоєння понять про чистоту металів та основні фізико-хімічні властивості особливо чистих металів та галузі їх застосування, класифікацію рафінувальних процесів; сутність основних методів отримання особливо чистих кольорових металів.

У цій темі необхідно уяснити основні властивості особливо чистих металів та галузі їх застосування; класифікацію рафінувальних процесів; сутність методів отримання особливо чистих металів.

Вивчивши тему, студент повинен:

- знати основні фізико-хімічні властивості особливо чистих кольорових металів;
- вміти вибрати галузі застосування особливо чистих металів;
- знати класифікацію рафінувальних процесів при отриманні особливо чистих кольорових металів;
- знати основи методів отримання особливо чистих кольорових металів.

2.1.4 Питання для самоперевірки

1. У яких одиницях виражається чистота металів і зміст домішок?
2. Чотири категорії ступеня чистоти реактивів.
3. Промілле: позначення і співвідношення з відсотком.
4. Розкрийте суть одиниць *ppm*, *ppb* і *ppT*.
5. Розшифруйте вміст домішки бору в кремнії, виражений як 10^{10} і 10^{20} ат/см^3 .
6. Загальні принципи класифікації рафінувальних процесів.
7. Суть будь-якого методу рафінування.
8. Чотири укрупнені групи методів очищення металів.
9. Три види домішок в металах і їх характеристика.
10. Які способи рафінування відносяться до адсорбційних?
11. Які способи рафінування складають групу неадсорбційних?
12. Суть способів очищення металів від неметалічних і газових домішок.
13. Поняття ліквідації і її роль в металургійних процесах.
14. Суть методу ліквідаційного рафінування.
15. Умови проведення (технологія) процесу грубого обмежування чорного свинцю.
16. Суть методу сульфідуючого рафінування і реакція в загальному вигляді.
17. Фізико-хімічні умови здійснення окислювального рафінування.
18. Поняття розкислювання. Вимоги до розкислювача.
19. Фізико-хімічна суть лужного рафінування (на прикладі очищення чорного свинцю від миш'яку, сурми і олова).
20. Поняття дистиляції.

21. Суть методу дистиляційного рафінування і приклади його застосування.
22. Діаграма фазової рівноваги в координатах P - T для однокомпонентної системи.
23. Роль вакууму при дистиляції.
24. Суть вакуумного дистиляційного рафінування (на прикладі знецинкування свинцю).
25. Поняття ректифікації.
26. Що таке флегма і флегмове число?
27. Склад установки ректифікації і пристрій колони.
28. Поняття про хімічні транспортні реакції.
29. Чим відрізняється метод ХТР від звичайної дистиляції?
30. Що таке субсполука і чим визначається вірогідність її утворення?
31. Суть методу очищення металів через їх субсполуки?
32. Суть йодидного методу очищення металів?
33. Суть і реакція карбонільного рафінування.
34. Електрохімічне рафінування: три стадії електродного процесу, електрохімічна і дифузійна кінетика.
35. Електрохімічне рафінування: поведінка домішок залежно від величини і знаку їх електродного потенціалу.
36. Приклади електрохімічного рафінування у водних розчинах і розплавлених солях.
37. Кристалофізичне рафінування: суть і різновиди методу.
38. Суть методу Чохральського.
39. Суть методу зонної плавки.
40. Коефіцієнт розподілу: аналітичний вираз і можливі чисельні значення.

Тема 2.2 Металургія особливо чистих металів (4 години лекцій та самостійна робота)

2.2.1 Програма

Металургія особливо чистих легких металів. Властивості та галузі застосування чистих алюмінію, літію і титану. Методи одержання алюмінію, літію і титану підвищеної чистоти.

Металургія особливо чистих важких металів. Властивості та галузі

застосування чистих міді, нікелю, свинцю, цинку, олова. Технологія одержання чистих важких металів.

Металургія особливо чистих рідкісних металів. Властивості та галузі застосування чистих цирконію, молібдену, вольфраму, ніобію, ванадію. Технологія одержання чистих рідкісних металів.

2.2.2 Література

[3], С.127-155; [4], С. 7-329.

2.2.3 Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоєння основних властивостей, галузі застосування та технології одержання особливо чистих легких, важких та рідкісних металів.

У цій темі необхідно уявити основні фізико-хімічні властивості особливо чистих легких, важких та рідкісних металів та галузі їх застосування. А також уявити сутність методів отримання цих металів.

Вивчивши тему, студент повинен:

- знати основні фізико-хімічних властивості особливо чистих легких, важких та рідкісних металів;
- вміти вибрати галузі застосування особливо чистих легких, важких та рідкісних металів;
- знати основи методів отримання особливо чистих легких, важких та рідкісних металів.

2.2.4 Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого алюмінію?
2. Вкажіть галузі застосування особливо чистого алюмінію?
3. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого алюмінію.
4. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого літію?
5. Вкажіть галузі застосування особливо чистого літію?
6. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого літію.
7. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого титану?
8. Вкажіть галузі застосування особливо чистого титану?
9. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого титану.

10. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого магнію?
11. Вкажіть галузі застосування особливо чистого магнію?
12. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого магнію.
13. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистої міді?
14. Вкажіть галузі застосування особливо чистої міді?
15. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистої міді.
16. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого нікелю?
17. Вкажіть галузі застосування особливо чистого нікелю?
18. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого нікелю.
19. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого свинцю?
20. Вкажіть галузі застосування особливо чистого свинцю?
21. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого свинцю.
22. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого цинку?
23. Вкажіть галузі застосування особливо чистого цинку?
24. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого цинку.
25. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого олова?
26. Вкажіть галузі застосування особливо чистого олова?
27. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого олова.
28. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого цирконію?
29. Вкажіть галузі застосування особливо чистого цирконію?
30. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого цирконію.
31. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого молібдену?
32. Вкажіть галузі застосування особливо чистого молібдену?
33. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого молібдену.
34. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого вольфраму?
35. Вкажіть галузі застосування особливо чистого вольфраму?
36. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого вольфраму.
37. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого ніобію?
38. Вкажіть галузі застосування особливо чистого ніобію?
39. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого ніобію.
40. Назвіть основні фізико-хімічні властивості особливо чистого ванадію?
41. Вкажіть галузі застосування особливо чистого ванадію?
42. Розкрийте технологічні особливості отримання особливо чистого ванадію.

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОННАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

По дисципліні «Металургія особливо чистих металів» передбачається для студентів-заочників 4 години практичних занять.

Практичні заняття проводяться в аудиторіях під керівництвом викладача і є підготовкою до домашнього завдання.

3.1 Лабораторна робота №1 (4 години)

Математична модель і розрахунок розподілу домішок у кремнії при кристалізаційному очищенні

3.1.1 Мета роботи

Розрахувати розподіл домішок уздовж зливка напівпровідникового матеріалу при очищенні методом зонної плавки (один прохід розплавленої зони): матеріал – кремній; домішковий елемент, його початкову концентрацію і швидкості переміщення зони – див. в індивідуальному завданні.

3.1.2 Теоретична частина

Опис процесу зонної плавки і її математична модель

Очищення напівпровідникових матеріалів методом зонної плавки запропонував в 1952 році Пфанн. Зонна плавка, заснована на різній розчинності домішок в твердій і рідкій фазах матеріалу, що очищається, є одним з найбільш ефективних і продуктивних методів глибокого очищення монокристалів. При його реалізації перед початком кристалізації розплавляється не вся тверда фаза кристала (рис.3.1), а тільки вузька розплавлена зона, яку переміщують уздовж зливка.

Більшість домішок володіють кращою розчинністю в рідкій фазі в порівнянні з твердою (рівноважний коефіцієнт сегрегації $k_0 < 1$), тому у міру просування зона плавлення все більше насичується домішками, які скупчуються в кінці зливка. Зазвичай процес зонної плавки повторюють кілька разів, після закінчення очищення забруднений кінець зливка відрізають. Для прискорення процесу очищення уздовж контейнера ставлять декілька

індукторів для утворення ряду зон плавлення. Для домішок з $k_0 > 1$ очищення матеріалів зонною плавкою практично неможлива.



Рисунок 3.1 – Схема зонної плавки

Розподіл домішок після одного проходу розплавленою зоною уздовж зливка представляється рівнянням

$$N_{me} = N_o \cdot \{1 - (1 - \kappa_o) \cdot \exp(-k_o \cdot x/l)\}, \quad (3.1)$$

де N_{me} – концентрація домішки у фазі, що закристилізувалася, на відстані x від початку зливка;

N_o – початкова концентрація домішки в матеріалі, що очищається;

x – поточна координата (відстань від початку зливка);

l – довжина розплавленої зони;

k_o – рівноважний коефіцієнт розподілу.

Якщо вимірювати довжину зливка в довжинах розплавленої зони $a = x/l$, вираз (3.1) слід записати інакше:

$$N_{me} = N_o \cdot \{1 - (1 - \kappa_o) \cdot \exp(-k_o \cdot a)\}. \quad (3.2)$$

Наведені рівняння (3.1) і (3.2), що є математичним описом процесу зонної плавки, виведені при певних допущеннях, сформульованих автором методу зонного очищення Пфанном при виведенні цих рівнянь. Ці допущення в літературі прийнято називати Пфанновськими, їх суть в наступному:

- 1) Процесами дифузійного перерозподілу компонентів системи в обсязі зливка можна знехтувати, тобто коефіцієнти дифузії компонентів у твердій фазі приймаються рівними нулю ($D_{mv} = 0$);
- 2) дифузія компонентів системи в рідкій фазі досконала - концентрація компонентів постійна за обсягом розплаву в будь-який момент процесу;
- 3) коефіцієнт розподілу домішки - величина постійна і не залежить від концентрації домішки в кристалізованій речовині (криві солідус і ліквідус діаграми стану прямолінійні);
- 4) початкова концентрація компонентів у вихідному матеріалі (зливку) однакова по всіх перетинах;
- 5) геометрії, що піддаються зонній плавці злитка (довжина і поперечний переріз), в ході процесу залишаються постійними, щільності твердої і рідкої фаз рівні ($\rho_{mv} = \rho_{жс} = \rho$);
- 6) розплав і тверда фаза при зонній плавці не взаємодіють з навколишнім середовищем - атмосферою і контейнером. Іншими словами, в системі немає легких і дисоціюючих компонентів, відсутня поглинання домішок розплавом з атмосфери, матеріал контейнера не розчиняється у рідкій фазі

Рівняння (3.1) і (3.2) справедливі тільки на ділянках злитка, на яких зона має дві межі розділу фаз (постійний об'єм). Коли в системі залишається межа, що тільки кристалізується, розподіл домішки представляється іншим рівнянням, відповідним процесу нормальної направленої кристалізації. Іншими словами, якщо довжина зливка, що очищається, в довжинах зон дорівнює $A = L/l$, то рівняння (3.1) і (3.2) справедливі на довжині $a = (L - l)/l = A - 1$.

При $a > A - 1$:

$$N_{mv} = N_o \cdot k_{эфф} (1 - g)^{(k_{эфф} - 1)}, \quad (3.3)$$

де g - частка розплаву останньої ділянки, що закристалізувалася.

Тільки при проведенні процесу в умовах, коли задовольняються всі вимоги, що приведені вище, реальний розподіл домішки в зливку після зонної плавки відповідатиме закону, представленому виразами (3.1) і (3.2).

Виконання умови постійності концентрації компонентів за об'ємом

розплаву можливо в даній ситуації тільки при реалізації повного (ідеального) перемішування рідкої фази. Передбачається, що в цьому випадку перерозподіл компонентів і вирівнювання складу в рідкій фазі відбувається миттєво, тобто ефективний коефіцієнт дифузії в рідкій фазі $D_{жс} = \infty$.

Умову повного перемішування на практиці реалізувати неможливо. Процеси масопереносу в розплавленій зоні при реальних швидкостях кристалізації і розумній інтенсивності перемішування завжди приводять до утворення дифузійного шару на межі розділу фаз в області кристалізації. Наявність шаруючи рідині з концентраційним піком, з якого і походить кристалізація, вплив його на умови розділення компонентів враховується введенням у вирази (3.1) і (3.2) ефективного коефіцієнта розподілу $k_{эфф}$ замість рівноважного k_o .

Рівноважний коефіцієнт сегрегації пов'язаний з ефективним співвідношенням Бартона-Пріма-Сліхтера:

$$k_{эфф} = \frac{k_o}{k_o + (1 - k_o) \exp\left(-\frac{V_{кр} \cdot \delta}{D_{жс}}\right)}, \quad (3.4)$$

де $V_{кр}$ - швидкість переміщення розплавленої зони (швидкість кристалізації);

δ - товщина дифузійного шару;

$D_{жс}$ - коефіцієнт дифузії домішки в рідкій фазі.

Ця заміна є лише більш менш вдалим наближенням до реальної ситуації, і не повністю відповідає вимозі умови постійності концентрації.

Розподіл домішки після зонної плавки для реальних процесів описується виразом

$$N_{mv} = N_o \cdot \{1 - (1 - k_{эфф}) \cdot \exp(-k_{эфф} \cdot a)\}. \quad (3.5)$$

Даний вираз дозволяє аналізувати вплив на процеси сегрегації швидкості переміщення зони і умов перемішування рідкої фази.

Допущення 3 справедливо тільки для сильно розбавлених розчинів, тобто при малих концентраціях домішки в системі. Крім того, умова малої концентрації повинна дотримуватися впродовж всього процесу зонної плавки.

Для того, щоб допущення 3 виявилось спроможним, потрібно використовувати при кристалізаційному очищенні початкові матеріали, що пройшли попереднє очищення.

3.1.3 Приклад розрахунку розподілу домішки упродовж зливка кремнію після зонної плавки

Початкові дані: домішковий елемент – галій, швидкості переміщення зони $V_{кр} = 1,5; 5 \text{ і } 15$ мм/хв, початкова концентрація $N_0 = 0.02\%$ (масових). Довжина зони l складає 10% від довжини зливка L . Випаровуванням домішки при переплавленні нехтувати.

Розподіл галію уздовж зливка визначається рівнянням (3.5) на довжині зливка $a = (L - l)/l = A-1$, , тобто при $0 \leq a \leq 9$.

При $a > 9$ розподіл домішки представляється рівнянням (3.3). Частка розплаву g , що закристалізовувався, на цій ділянці змінюється від нуля до величини, близької до одиниці. Для $g = 1$ рівняння (3.3) не має сенсу.

Перш ніж приступити до розрахунку, переведемо N_0 з % (масових) у % (атомні), а потім в см^{-3} . Для цього скористаємося формулою перекладу:

$$N_1(\%am) = \frac{N_1(\%масс)/A_1}{N_1(\%масс)/A_1 + N_2(\%масс)/A_2} \cdot 100\%, \quad (3.6)$$

де A_1, A_2 – атомні маси компонентів;

N_2 – другий компонент суміші.

Атомні маси: для галію - 69,72 ; для кремнію - 28,08 .

$$N_{Ga}(\%am) = \frac{0,02/69,72}{0,02/69,72 + 99,98/28,08} \cdot 100\% = 8,06 \cdot 10^{-3}\%.$$

Концентрація власних атомів в кристалічній решітці кремнію $N_{собо} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Отже, початкова концентрація галію в зливку:

$$N_0 = 8,06 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^{22} = 4,03 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

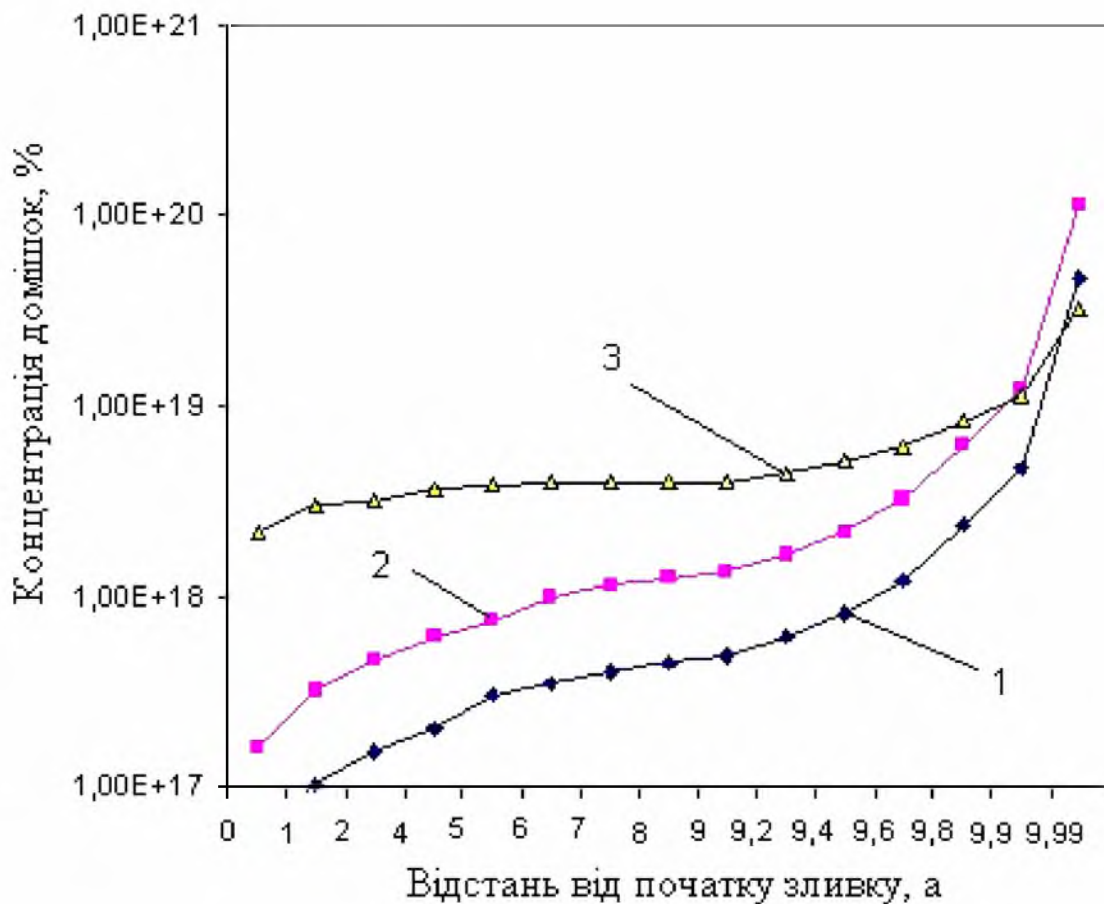
Для розрахунку ефективного коефіцієнта сегрегації скористаємося виразом (3.4). Для галію в кремнії $k_0 = 8 \cdot 10^{-3}$, відношення $\delta/D_{жс} = 200$ с/см.

Підставляючи значення $k_0, \delta/D_{жс}, V_{кр}$ в (3.4), обчислимо $k_{ef}...$ Для цього $V_{кр}$

переведемо з мм/хв в см/с, отримаємо $V_{кр} = V_{кр} = 2,5 \cdot 10^{-3}; 8,33 \cdot 10^{-3}; 2,5 \cdot 10^{-2}$ см/с. Відповідно отримаємо $k_{ef.} = 1,3 \cdot 10^{-2}; 4,09 \cdot 10^{-2}; 0,545$.

- Заповнюємо розрахункову таблицю (табл. 3.1), змінюючи з обраним кроком відстань від початку зливка в довжинах зони а (на ділянці зонної плавки). Останню ділянку зливка, на якому домішка розподіляється відповідно до рівняння (3.3), розбиваємо, змінюючи відстань від початку цієї ділянки, пропорційно частці розплаву g , що закристаллізувався.

- Отримані результати використовуються для побудови графіка (рис.3.2) розподілу домішки $N_{те}$ вздовж зливку. При побудові профілю, як правило, використовують напівлогарифмічний масштаб, тому що значення концентрації змінюються практично на три порядки.



1 - $V_{кр} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ см/с; 2 - $V_{кр} = 8,33 \cdot 10^{-3}$ см/с; 3 - $V_{кр} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ см/с

Рисунок 3.2- Розподіл домішки галію уздовж зливка кремнію після зонної плавки (один прохід розплавленої зони)

Таблиця 3.1 - Розподіл галію уздовж зливка кремнію після зонної плавки
(один прохід розплавленою зоною)

Ділянка зонної плавки		Ділянка направленої кристалізації	
а	$N_{mv}, \text{см}^{-3}$	$g (\alpha=10)$	$N_{mv}, \text{см}^{-3}$
$V_{kp}=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ см/с}$			
0	$5,24 \cdot 10^{16}$	0	$4,92 \cdot 10^{17}$
1	$1,04 \cdot 10^{17}$	0,2	$6,13 \cdot 10^{17}$
2	$1,54 \cdot 10^{17}$	0,4	$8,15 \cdot 10^{17}$
3	$2,04 \cdot 10^{17}$	0,6	$1,22 \cdot 10^{18}$
4	$2,54 \cdot 10^{17}$	0,8	$2,41 \cdot 10^{18}$
5	$3,03 \cdot 10^{17}$	0,9	$4,77 \cdot 10^{18}$
6	$3,51 \cdot 10^{17}$	0,99	$4,63 \cdot 10^{19}$
7	$3,98 \cdot 10^{17}$	–	–
8	$4,45 \cdot 10^{17}$	–	–
9	$4,92 \cdot 10^{17}$	–	–
$V_{kp}=8,33 \cdot 10^{-3} \text{ см/с}$			
0	$1,6 \cdot 10^{17}$	0	$1,35 \cdot 10^{18}$
1	$3,2 \cdot 10^{17}$	0,2	$1,67 \cdot 10^{18}$
2	$4,68 \cdot 10^{17}$	0,4	$2,2 \cdot 10^{18}$
3	$6,11 \cdot 10^{17}$	0,6	$3,25 \cdot 10^{18}$
4	$7,48 \cdot 10^{17}$	0,8	$6,32 \cdot 10^{18}$
6	$1,0 \cdot 10^{18}$	0,9	$1,23 \cdot 10^{19}$
7	$1,13 \cdot 10^{18}$	0,99	$1,12 \cdot 10^{20}$
8	$1,24 \cdot 10^{18}$	–	–
9	$1,35 \cdot 10^{18}$	–	–
$V_{kp}=2,5 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}$			
0	$2,2 \cdot 10^{18}$	0	$4,02 \cdot 10^{18}$
1	$2,97 \cdot 10^{18}$	0,2	$4,45 \cdot 10^{18}$
2	$3,41 \cdot 10^{18}$	0,4	$5,07 \cdot 10^{18}$
3	$3,67 \cdot 10^{18}$	0,6	$6,1 \cdot 10^{18}$
4	$3,82 \cdot 10^{18}$	0,8	$8,36 \cdot 10^{18}$
6	$3,96 \cdot 10^{18}$	0,9	$1,15 \cdot 10^{19}$
7	$3,98 \cdot 10^{18}$	0,99	$3,27 \cdot 10^{19}$
8	$4,01 \cdot 10^{18}$	–	–
9	$4,02 \cdot 10^{18}$	–	–

3.1.4 Питання для самоперевірки

1. Мета роботи.
2. Галузі застосування особливо чистого кремнію.
3. Суть очищення напівпровідникових матеріалів методом зонної плавки?
4. Рівняння для розрахунку розподілу домішок після одного проходу розплавленою зоною уздовж зливка?
5. Рівняння для розрахунку рівноважного коефіцієнта сегрегації пов'язано з ефективним співвідношенням Бартона-пріма-сліхтера?
6. Назвіть допущення сформульованих автором методу зонного очищення?

4 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Індивідуальне домашнє завдання присвячено детальному опису: властивостей та галузей застосування і технології одержання особливо чистих металів.

Метал, якому присвячена індивідуальне завдання, отримають від викладача.

Завдання оформлюється на аркушах А4: титульний аркуш, зміст, текст роботи, список використаної літератури; шрифт 14; інтервал 1-1,5; або рукописного у вигляді зошита.

ЗМІСТ

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.....	3
2 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ТЕМ.....	4
Тема 2.1 Теоретичні основи рафінування металів і сплавів.....	4
2.1.1 Програма.....	4
2.1.2 Література	4
2.1.3 Методичні вказівки.....	4
2.1.4 Питання для самоперевірки.....	5
Тема 2.2 Металургія особливо чистих металів.....	6
2.2.1 Програма.....	6
2.2.2 Література	7
2.2.3 Методичні вказівки.....	7
2.2.4 Питання для самоперевірки.....	7
3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОННАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	
3.1 Лабораторна робота №1	9
3.1.1 Мета роботи.....	9
3.1.2 Теоретична частина.....	9
3.1.3 Приклад розрахунку розподілу домішки упродовж зливка кремнію після зонної плавки.....	9 13
3.1.4 Питання для самоперевірки.....	16
4 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ.....	16