

**Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
Донецький національний технічний університет**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до курсової роботи з дисципліни
„Теорія пірометалургійних процесів”
(для студентів спеціальності 7.0904.02
„Металургія кольорових металів”)**

РОЗГЛЯНУТО:

На засіданні кафедри
„Кольорова металургія і
конструкційні матеріали”

Протокол №7 від 18.12.06

ЗАТВЕРДЖЕНО:

На засіданні учбово-видавничої
Ради ДонНТУ

Протокол №_____ від _____

УДК 669.02

Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни „Теорія пірометалургійних процесів” (для студентів спеціальності 7.0904.02 „Металургія кольорових металів”) / Уклад. М.О. Маняк, І.О. Орлов, М.В. Гольцова. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – 46 с.

Наведено мету і задачі курсової роботи, зміст і порядок її виконання. Надано приклади розрахунку процесів дисоціації і утворення сполук, процесів відновлення оксидів металів, а також необхідний довідковий матеріал, який використовується при розрахунках процесів пірометалургії.

Укладачі:	професор	М.О. Маняк
	асистент	І.О. Орлов
	доцент	М.В. Гольцова

Рецензент:	професор	А.Д. Рябцев
------------	----------	-------------

Зміст

	Стор.
Загальні відомості	4
1. Процеси дисоціації і утворення карбонатів, оксидів і сульфідів	4
1.1. Дисоціація карбонатів	4
1.2. Рівноважний тиск кисню в системі метал – оксид металу	6
1.3. Термодинамічні характеристики міцності сульфідів	8
2 Процеси відновлення оксидів металів	9
2.1. Відновлення оксидів металів газоподібними відновлювачами	9
2.2. Металотермічне відновлення	13
2.3. Відновлення оксидів металів твердим вуглецем	16
3. Варіанти завдань	24
Додатки	29
Додаток А. Форма титульного листа	29
Додаток Б. Зміна енергії Гіббса для реакцій утворення сполук із компонентів у стандартному стані	30
Додаток В. Термодинамічні властивості простих речовин у стандартному стані	35
Додаток Г. Термодинамічні властивості хімічних сполук	37
Додаток Д. Ентальпії і температури поліморфних перетворювань ($\Delta H_{пер.}$), плавлення ($\Delta H_{пл.}$) і випарування ($\Delta H_{вип.}$) деяких металів та їхніх сполук	45

Загальні відомості

Курсова робота виконується студентами спеціальності 7.0904.02 – Металургія кольорових металів у VI семестрі при вивченні дисципліни „Теоретичні основи пірометалургійних процесів”. Робота містить типові розрахунки процесів дисоціації і утворення карбонатів, оксидів і сульфідів та процесів відновлення оксидів кольорових металів і виконується за індивідуальними варіантами.

Розрахунково-інформаційна записка включає титульний лист (*додаток А*), реферат, зміст, завдання на курсову роботу, опис роботи, бібліографічний покажчик використаних витоків інформації.

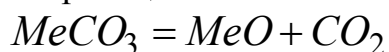
Опис роботи поділяють на розділи, підрозділи, пункти і підпункти відповідно до характеру виконуваної роботи. Він являє собою текст, доповнений формулами, рівняннями реакцій, таблицями та ілюстраціями.

Студенти виконують курсову роботу самостійно у позаучбовий час, використовуючи дані вказівки, а також джерела інформації, рекомендовані у даних вказівках.

1. Процеси дисоціації і утворення карбонатів, оксидів і сульфідів

Дисоціація карбонатів

При нагріванні вуглекислих солей (карбонатів) вони розпадаються на більш прості молекули. Наприклад, карбонат $MeCO_3$ при нагріванні до високих температур дисоціює за ендотермічною реакцією



Якщо карбонат і оксид металу існують у вигляді чистих кристалічних фаз і не утворюють твердих розчинів, то константа рівноваги реакції числено дорівнює рівноважному тиску CO_2 у газовій фазі:

$$K'_p = P_{CO_2} \quad (1)$$

Цей рівноважний тиск CO_2 називають пружністю дисоціації карбонату або рівноважним тиском дисоціації карбонату. Величина пружності дисоціації карбонату залежить від температури і від термодинамічної міцності самого карбонату. Кількісною характеристикою міцності карбонату може бути величина пружності дисоціації при даній температурі, а також зміна енергії Гіббса для реакції утворення карбонату.

Реакція дисоціації карбонату можлива за умов, якщо значення пружності дисоціації карбонату P_{CO_2} буде більш, ніж парціальний тиск CO_2 в навколишньому середовищі p_{CO_2} :

$$P_{CO_2} > p_{CO_2} \quad (2)$$

Проте, інтенсивне розпадання карбонату при нагріванні починається тоді, коли величина пружності дисоціації карбонату стане більшою, ніж загальний тиск P у газовій фазі:

$$P_{CO_2} > P \quad (3)$$

Температура, при якій пружність дисоціації карбонату дорівнюватиме парціальному тиску CO_2 у газовій фазі ($P_{CO_2} = p_{CO_2}$), є температурою початку розпадання карбонату. Температура, при якій пружність дисоціації карбонату дорівнювати загальному тиску в системі є температурою хімічного кипіння карбонату.

Для розрахунків пружності дисоціації карбонатів в залежності від температури використовують рівняння

$$\lg P_{CO_2} = \frac{A}{T} + B. \quad (4)$$

Ця залежність виходить з залежності ΔG° реакції утворення карбонату:



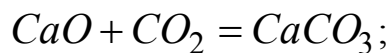
$$\lg K_p = -\lg P_{CO_2} = -\frac{\Delta G^\circ}{19,155T}; \quad (5)$$

$$\lg P_{CO_2} = \frac{\Delta G^\circ}{19,155T} = \frac{M + NT}{19,155T} = \frac{M}{19,155T} + \frac{N}{19,155}$$

Підставляючи замість M та N відповідні чисельні значення з довідкових таблиць для ΔG° реакцій утворення карбонатів (додаток Б), знаходимо величину коефіцієнтів A і B в рівнянні (4).

Приклад 1. Визначити температуру, при котрій пружність дисоціації карбонату $CaCO_3$ дорівнюватиме $1,3 \times 10^5$ Па.

Рішення. Залежність пружності дисоціації від температури для карбонату $CaCO_3$ знаходимо із рівняння температурної залежності ΔG° для реакції утворення $CaCO_3$.



$$\Delta G_{CaCO_3}^\circ = -170577 + 144,19T$$

Згідно з рівнянням (5) визначимо:

$$\left(\lg P_{CO_2}\right)_{CaCO_3} = -\frac{170577}{19,155T} + \frac{144,19}{19,155} = -\frac{8905}{T} + 7,53.$$

Підставляючи в це рівняння замість P_{CO_2} заданий тиск $1,3 \times 10^5$ Па, знаходимо, що для карбонату $CaCO_3$ заданий тиск досягне при температурі:

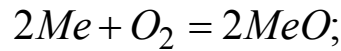
$$T = \frac{A}{\lg P_{CO_2} - B} = \frac{-8905}{\lg(1,3 \cdot 10^5 / 10^5) - 7,53} = 1200 \text{ К.}$$

Таким чином, температура дисоціації $CaCO_3$ при пружності дисоціації $1,3 \times 10^5$ Па повинна бути 1200 К.

Рівноважний тиск кисню в системі метал – оксид металу.

Знання про рівноважний тиск дає можливість визначити якісні характеристики міцності оксидів, умови їх утворення і розпадання.

Взагалі реакція утворення оксиду металу виглядає таким чином:



$$K_p = \frac{1}{(P_{O_2})_{MeO}}. \quad (6)$$

Рівноважний тиск кисню $(P_{O_2})_{MeO}$ є пружність дисоціації оксиду. Тому знання рівноважного тиску кисню в системі метал – оксид металу є важливим для визначення технології окислення чи відновлення металу.

Як приблизний метод розрахунку $(P_{O_2})_{MeO}$ використовується ентропійний метод. Величина $(P_{O_2})_{MeO}$ визначається із значення стандартної зміни енергії Гіббса щодо реакції утворення оксиду:

$$\Delta G_{MeO}^\circ = -19,155T \lg K_p = 19,155T \lg(P_{O_2})_{MeO};$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ; \quad (7)$$

$$\lg(P_{O_2})_{MeO} = \frac{\Delta G_{MeO}^\circ}{19,155T} = \frac{\Delta H^\circ}{19,155T} - \frac{\Delta S^\circ}{19,155}.$$

Сутність методу полягає в тому, що припускають незалежність ΔH° і ΔS° від температури. Тобто, для різних температур приймають значення ΔH_{298}° і ΔS_{298}° (додатки В, Г). Із цього маємо:

$$\Delta H^\circ = 2(\Delta H_{298}^\circ)_{MeO} - 2(\Delta H_{298}^\circ)_{Me} - (\Delta H_{298}^\circ)_{O_2}.$$

Оскільки теплоти утворення простих речовин $\Delta H_{298}^\circ = 0$, два останні додатки дорівнюють нулю, тому отримуємо

$$\Delta H^\circ = 2(\Delta H_{298}^\circ)_{MeO}. \quad (8)$$

Для зміни ентропії:

$$\Delta S^\circ = 2(\Delta S_{298}^\circ)_{MeO} - 2(\Delta S_{298}^\circ)_{Me} - (\Delta S_{298}^\circ)_{O_2}. \quad (9)$$

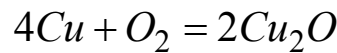
Після підстановки значень ΔH° і ΔS° в рівняння (7) знаходимо температурну залежність $(P_{O_2})_{Me} = f(T)$.

Цей метод дає приблизні значення $(P_{O_2})_{MeO}$, оскільки не ураховується вплив температури на ΔH° і ΔS° .

В цей час накопичено багато фактичного матеріалу щодо експериментального вивчення рівноваг в системі метал – оксид – газова фаза. Цей матеріал буде викладено в лекціях. Треба відмітити, що дані теоретичного і експериментального досліджень практично не відрізняються. При проведенні НДРС Вам буде надано можливість оцінити адекватність результатів, які отримані теоретичним і експериментальним способами.

Приклад 2. Визначити пружність дисоціації оксиду Cu_2O для температур 800, 900, 1000 та 1100 К ентропійним методом.

Рішення. Реакція утворення заданого оксиду (Cu_2O):



$$\Delta H^\circ = 2(\Delta H_{298}^\circ)_{Cu_2O}$$

$$\Delta S^\circ = 2(S_{298}^\circ)_{Cu_2O} - 4(S_{298}^\circ)_{Cu} - (S_{298}^\circ)_{O_2}$$

Підставляючи в ці рівняння значення ΔH_{298}° та ΔS_{298}° (додатки В, Г), отримуємо:

$$\Delta H^\circ = 2(-173290) = -346580, \text{ Дж};$$

$$\Delta S^\circ = 2 \cdot 92,99 - 4 \cdot 33,2 - 205,2 = -152,02, \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Підставляємо отримані значення в рівняння (7):

$$\begin{aligned} \lg(P_{O_2})_{Cu_2O} &= \frac{\Delta H^\circ}{19,155T} - \frac{\Delta S^\circ}{19,555} = \\ &= \frac{(-346580)}{19,155T} - \frac{(-152,02)}{19,155} = -\frac{18093}{T} + 7,936 \end{aligned}$$

Для заданих температур отримуємо наступні значення пружності дисоціації, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1 Залежність пружності дисоціації Cu_2O від температури

Температура, К	800	900	1000	1100
$\lg(P_{O_2})_{Cu_2O}$	- 14,68	- 12,17	- 10,16	- 8,51
$(P_{O_2})_{Cu_2O} \cdot 10^5, \text{ Па}$	$2,09 \cdot 10^{-10}$	$6,80 \cdot 10^{-8}$	$6,97 \cdot 10^{-6}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$

Отримані залежності представити у графічному вигляді.

Термодинамічні характеристики міцності сульфідів

Як термодинамічна характеристика міцності сульфідів може бути рівноважний тиск пари сірки у системі $Me - MeS$, який за аналогією з величиною рівноважного тиску кисню для системи $Me - MeO$ звать пружністю дисоціації сульфїду.

При температурах 700 – 1200°C сірка у газовій фазі знаходиться переважно у вигляді двохатомних молекул. Тому реакція утворення сульфїду з участю двохвалентного металу має вигляд:



Константа рівноваги реакції

$$K_p = \frac{a_{MeS}^2}{a_{Me}^2 (P_{S_2})_{MeS}}, \quad (11)$$

де $(P_{S_2})_{MeS}$ – рівноважний тиск сірки в газовій фазі, який зветься пружністю дисоціації сульфїду.

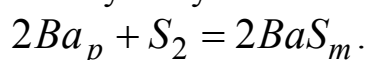
Для кількісної оцінки міцності сульфїдів використовується величина стандартної зміни енергії Гіббса реакції утворення сульфїду, яка пов'язана з рівноважним тиском сірки в системі:

$$\Delta G_{MeS}^\circ = -RT \ln K_p = -RT \ln (P_{S_2})_{MeS}. \quad (12)$$

Більш тривким (міцним) сульфїдам відповідає більш від'ємне значення ΔG° . За аналогією з оксидами тривкість (міцність) сульфїдів оцінюють ентропійним методом.

Приклад 3. Розрахуйте ентропійним методом рівноважний тиск сірки для реакції утворення сульфїду барію $2Ba + S_2 = 2BaS$ при температурі 1200 К.

Рішення. При температурі 1200 К сірка знаходиться у газоподібному стані, а барій – в рідкому стані ($T_{пл} = 983$ К). Тому реакцію записують з урахування агрегатного стану речовин, які приймають у ній участь:



Для реакції утворення ΔH° та ΔS° з урахуванням фазових перетворень:

$$\Delta H^\circ = 2(\Delta H_{298}^\circ)_{BaS} - 2(\Delta H_{пл})_{Ba} - 2(\Delta H_{пл})_S - 2(\Delta H_{вун})_S;$$

$$\Delta S^\circ = 2(S_{298}^\circ)_{BaS} - 2(S_{298}^\circ)_{Ba} - 2(\Delta S_{пл})_{Ba} - 2(S_{298}^\circ)_S - 2(\Delta S_{пл})_S - 2(\Delta S_{вун})_S.$$

З додатків В, Г, Д знаходимо значення відповідних термодинамічних характеристик для речовин, які приймають участь у реакції.

Після підстановки відповідних значень термодинамічних характеристик маємо:

$$\Delta H^\circ = 2(-460500) - 2 \cdot 7662 - 2 \cdot 1411 - 2 \cdot 9630 = -958405 \text{ Дж};$$

$$\Delta S^\circ = 2 \cdot 78,3 - 2 \cdot 61,8 - 2 \cdot 7,79 - 2 \cdot 31,94 - 2 \cdot 3,60 - 2 \cdot 13,45 = -82,56 \text{ Дж / К};$$

$$\Delta G_{1200}^\circ = \Delta H^\circ - \Delta S^\circ T = -958405 + 82,56 \cdot 1200 = -859333 \text{ Дж}.$$

Константа рівноваги для цієї температури:

$$\lg K_p = -\frac{\Delta G^\circ}{19,155 \cdot T} = -\frac{(-859333)}{19,155 \cdot 1200} = 37,385;$$

$$(K_p)_{1200} = 2,427 \cdot 10^{37}.$$

Рівноважний тиск сірки знаходимо з рівняння для K_p :

$$K_p = \frac{1}{P_{S_2}};$$

$$P'_{S_2} = \frac{10^5}{K_p} = \frac{10^5}{2,427 \cdot 10^{37}} = 4,12 \cdot 10^{-33} \text{ Па}.$$

2. Процеси відновлення оксидів металів

Реакція відновлення оксиду металу може бути записана в загальному вигляді наступним чином:



де R - відновлювач.

В реальних процесах відновлення дуже часто беруть участь не чисті оксиди, а більш складні хімічні сполуки. Металічна і оксидна фази часто утворюють розчини або зазнають фазові перетворення. Тому для оцінки впливу різноманітних факторів на термодинамічну міцність оксиду, який відновлюється, зручно користуватися узагальненим рівнянням для кисневого потенціалу оксиду металу:

$$\pi_{\circ}(MeO) = \Delta G_{MeO}^\circ - RT \ln a_{[Me]}^2 + RT \ln a_{(MeO)}^2 + \sum (\Delta G)_{Me, MeO}, \quad (14)$$

де ΔG_{MeO}° – стандартна зміна енергії Гіббса для реакції утворення оксиду MeO ; $\sum (\Delta G)_{Me, MeO}$ додаткова зміна енергії Гіббса внаслідок фазових перетворень металу та оксиду.

Як відновлювачі часто використовують гази, які мають високу хімічну спорідненість до кисню (CO , H_2), метали, які утворюють міцні оксиди (Al , Ca , Si), а також твердий вуглець.

Відновлення оксидів металів газоподібними відновлювачами

Термодинамічні умови для відновлення оксидів газоподібними відновлювачами визначаються наступним співвідношенням кисневих потенціалів газової фази і оксиду металу:

$$\pi_{\circ}(г.ф.) < \pi_{\circ}(MeO) \quad (15)$$

Внаслідок прагнення системи до вирівнювання потенціалів, кисень переходить в газову фазу. Як газоподібні відновлювачі часто використовуються водень і

монооксид вуглецю. Кисневий потенціал газових сумішей $H_2 - H_2O$ і $CO - CO_2$ залежить від складу цих сумішей і температури.

Відновлення оксидів металів, які мають декілька ступенів окислення, відбувається послідовно. Так, відновлення оксидів заліза воднем при температурах вище 570°C (843 K) відбувається відповідно з реакціями:



При температурах нижче 570°C , коли вюстит стає термодинамічно нестійким, відновлення Fe_3O_4 відбувається до заліза:



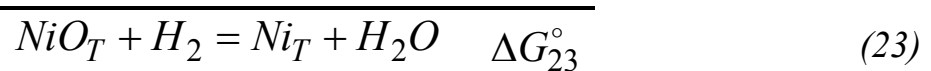
Реакція (16) є необоротною. Константи рівноваги інших реакцій мають один і той же вигляд:

$$K_P = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} = \frac{\%H_2O}{\%H_2} \quad (20)$$

Чисельне значення констант рівноваги різне для різних реакцій. Тому кожна реакція характеризується визначеним значенням складу рівноважної газової суміші $H_2 - H_2O$, яке змінюється з температурою.

Приклад 4. Для реакції відновлення оксиду нікелю воднем $NiO_m + H_2 = Ni_m + H_2O$ визначити значення константи рівноваги для температури 800 K і рівноважний вміст водню у газовій суміші $H_2 - H_2O$.

Рішення. Реакція відновлення NiO воднем бути відображена комбінацією двох реакцій:



$$\Delta G_{23}^\circ = \Delta G_{22}^\circ - \Delta G_{21}^\circ \quad (24)$$

із додатку B знаходимо:

$$\Delta G_{21}^\circ = -237224 + 85,62 \cdot T;$$

$$\Delta G_{22}^\circ = -246115 + 54,12 \cdot T$$

Визначимо залежність ΔG_{23}° від температури:

$$\Delta G_{23}^\circ = (-246115 + 54,12 \cdot T) - (-237224 + 85,62 \cdot T) = -8891 - 31,50 \cdot T.$$

при 800 К $(\Delta G_3^\circ)_{800} = -881 - 31,5 \cdot 800 = -34091 \text{ Дж}$.

Знаходимо значення константи рівноваги для реакції відновлення нікелю воднем:

$$\lg K_p = -\frac{\Delta G^\circ}{19,155 \cdot T} = -\frac{-34091}{19,155 \cdot 800} = 2,2247; \quad K_p = 167,8$$

Розрахуємо склад рівноважної газової суміші $H_2 - H_2O$. Константа рівноваги для реакції, що розглядається, має вигляд:

$$K_p = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} = \frac{\%H_2O}{\%H_2}$$

Позначимо $(\%H_2) = x$. Тоді $(\%H_2O) = 100 - x$.

Підставляючи ці позначки в рівняння отримаємо:

$$K_p = \frac{100 - x}{x} = \frac{100}{x} - 1; \quad x = \frac{100}{K_p + 1}$$

Для температури 800 К:

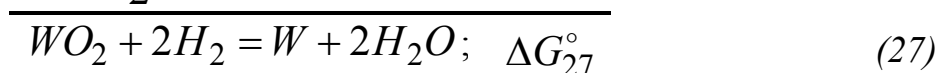
$$x = \frac{100}{167,8 + 1} = 0,59.$$

Отже, рівноважний склад газової суміші $H_2 - H_2O$ буде $H_2=0,59\%$; $H_2O=99,41\%$.

Таким чином для нестійкого оксиду NiO достатньо мати в газовій суміші менш 1% водню, щоб забезпечити розвиток реакції відновлення нікелю.

Приклад 5. Для реакції відновлення оксиду вольфраму воднем $WO_2 + 2H_2 = W + 2H_2O$ розрахувати рівноважний склад газової суміші $H_2 - H_2O$ для інтервалу температур 1000 – 1500 К і побудувати криву зміни складу рівноважної газової фази в цьому інтервалі.

Рішення. Термодинамічні характеристики реакції відновлення вольфраму воднем отримаємо комбінуванням реакцій утворення WO_2 і H_2O :



$$\Delta G_{27}^\circ = \Delta G_{26}^\circ - \Delta G_{25}^\circ \quad (28)$$

із додатку B знаходимо:

$$\Delta G_{25}^{\circ} = -585440 + 171,95 \cdot T;$$

$$\Delta G_{26}^{\circ} = -246115 + 54,12 \cdot T$$

Залежність ΔG_{27}° від температури буде мати вигляд:

$$\Delta G_{27}^{\circ} = 2(-246115 + 54,12 \cdot T) - (-585440 + 171,95 \cdot T) = 57210 - 63,71 \cdot T.$$

Визначимо залежність константи рівноваги реакції відновлення вольфраму воднем від температури:

$$\lg K_p = -\frac{\Delta G_{27}^{\circ}}{19,155 \cdot T} = -\frac{57210 - 63,71 \cdot T}{19,155 \cdot T} = -\frac{2987}{T} + 3,326$$

Для розрахунків складу рівноважної газової суміші $H_2 - H_2O$ при різних температурах запишемо рівняння для константи рівноваги реакції відновлення вольфраму воднем:

$$K_p = \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} \right)^2. \quad (29)$$

Для зручності розрахунків добуємо корінь з лівої і правої частини рівняння:

$$\sqrt{K_p} = \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} \right). \quad (30)$$

Позначимо $(\%H_2) = x$. Тоді $(\%H_2O) = 100 - x$.

Підставляючи ці позначки в (30) будемо мати:

$$\sqrt{K_p} = \frac{100 - x}{x}; \quad x = \frac{100}{\sqrt{K_p} + 1}.$$

Розрахунки значень K_p і складу рівноважної газової фази робимо для інтервалу температур 1000 – 1500 К через 100 град. Результати розрахунків зведено в табл. 2 і наведено на рис. 1.

Таблиця 2. Склад рівноважної газової суміші $H_2 - H_2O$ для реакції відновлення оксиду вольфраму.

T, K	$\lg K_p$	K_p	$\%H_2$	$\%H_2O$	T, K	$\lg K_p$	K_p	$\%H_2$	$\%H_2O$
1000	0,330	2,18	40,4	59,6	1300	1,028	10,67	23,4	76,6
1100	0,610	4,08	33,1	66,9	1400	1,192	15,58	20,2	79,8
1200	0,837	6,87	27,6	72,4	1500	1,335	21,61	17,7	82,3

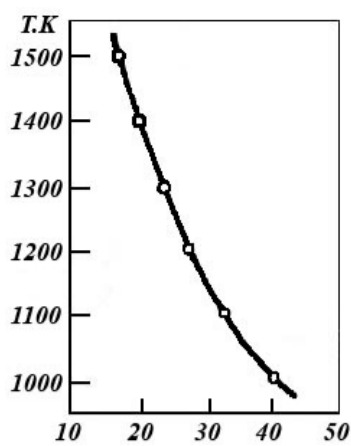
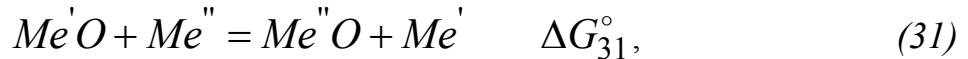


Рис.1 Вплив температури на вміст водню в рівноважній газовій фазі $H_2 - H_2O$ для реакції відновлення оксиду WO_2 воднем.

Доведено, що з підвищенням температури рівноважний вміст водню зменшується.

Металотермічне відновлення

Як відновлювачі в металургійних процесах використовують метали, які мають більш високу хімічну спорідненість до кисню, ніж метал, що відновлюється. Реакція металотермічного відновлення в загальному вигляді записується наступним чином:



де $Me'O$ – оксид металу, що відновлюється;

Me'' – метал – відновлювач.

Значення ΔG_{31}° цієї реакції визначається величинами ΔG° для реакції утворення оксидів $Me'O$ і $Me''O$:



$$\Delta G_{31}^{\circ} = \frac{1}{2}(\Delta G_{Me'O}^{\circ} - \Delta G_{Me''O}^{\circ}). \quad (34)$$

Реакція (31) може розвиватися в напрямку відновлення металу Me за умов, коли ΔG° буде мати від'ємне значення.

Як відновлювачі в металотермічних процесах найбільш широко використовуються алюміній і кремній. Відповідно, процеси відновлення різних оксидів цими металами називають силікотермічними або алюмотермічними.

Металотермічні процеси супроводжуються виділенням тепла. Внаслідок цього відбувається значне підвищення температури системи, що забезпечує швидкий розвиток реакції і отримання продуктів реакції в рідкому стані.

Розвиток металотермічного процесу без зовнішнього підігріву можливий тільки в тому разі, коли кількість тепла, що виділяється, достатня для отримання високої температури системи, що реагує. Характеристикою тепловиділення в металотермічному процесі є кількість тепла, яке виділяється на одиницю маси суміші, яка реагує. Ця характеристика зветься термічністю шихти і визначається таким чином:

$$q = -\frac{\Delta H_{298}^{\circ}}{\sum M}, \quad (35)$$

де ΔH_{298}° – стандартне значення теплового ефекту металотермічного відновлення;

$\sum M$ – сума молекулярних або атомних мас вихідних речовин, узятих у стехіометричних співвідношеннях.

Згідно з правилом Жемчужного, для розвитку металотермічного відновлення без зовнішнього підігріву термічність шихти повинна бути більш, ніж 2300 Дж/г.

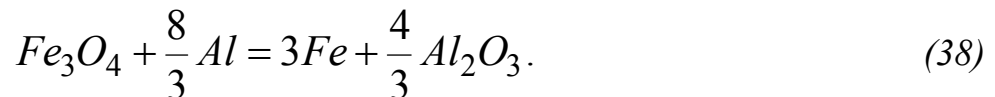
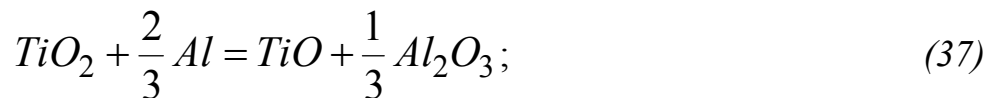
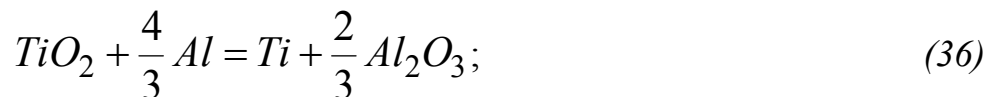
При недостатній термічності шихти нормальний розвиток металотермічного процесу забезпечується введенням в склад шихти легковідновлюваних оксидів або переносом процесу в піч з зовнішнім підігрівом.

Властивості речовин, що реагують, в металотермічних процесах можуть змінюватись під впливом супроводжуваних процесів плавлення, випаровування, розчинення і т. ін. Ці додаткові явища змінюють значення хімічного споріднення до кисню відновлювача і металу, що відновлюється. Кількісне урахування цих явищ виконується на основі рівняння для кисневого потенціалу оксидів (14).

Усі фактори, які призводять до збільшення $\pi_{\circ}(Me'O)$ і зниження $\pi_{\circ}(Me''O)$, сприяють підвищенню ефективного металотермічного процесу.

Приклад 6. При отриманні титану алюмотермічними відновленням TiO_2 реакція характеризується недостатнім тепловиділенням. Для підвищення термічності процесу в склад шихти додають легковідновлюваний оксид Fe_3O_4 . Розрахувати кількість Fe_3O_4 , яку необхідно додати на 100 г TiO_2 , щоб термічність шихти дорівнювала 2500 Дж/г і визначити склад отриманого феротитану. В розрахунках урахувати, що 50% TiO_2 відновлюється до Ti , а 50% – до TiO , який переходить в шлак.

Рішення. Визначимо значення стандартних теплових ефектів реакцій:



Теплоти утворення оксидів знаходимо в додатку Г.

$$(\Delta H_{298}^{\circ})_{(36)} = \frac{2}{3}(\Delta H_{298}^{\circ})_{Al_2O_3} - (\Delta H_{298}^{\circ})_{TiO_2} =$$

$$= \frac{2}{3}(-1676,8) - (-944,5) = -173,4 \text{ кДж};$$

$$(\Delta H_{298}^{\circ})_{(37)} = \frac{1}{3}(\Delta H_{298}^{\circ})_{Al_2O_3} + (\Delta H_{298}^{\circ})_{TiO} - (\Delta H_{298}^{\circ})_{TiO_2} =$$

$$= \frac{1}{3}(-1676,8) + (-526,3) - (-944,5) = 140,7 \text{ кДж};$$

$$(\Delta H_{298}^{\circ})_{(38)} = \frac{4}{3}(\Delta H_{298}^{\circ})_{Al_2O_3} - (\Delta H_{298}^{\circ})_{Fe_3O_4} =$$

$$= \frac{4}{3}(-1676,8) - (-1117,9) = -1117,8 \text{ кДж}.$$

Термічність шихти для кожної реакції буде:

$$q_{(36)} = -\frac{(\Delta H_{298}^{\circ})_{(36)}}{(\sum M)_{(36)}} = \frac{173400}{79,9 + \frac{4}{3} \cdot 26,98} = 1496 \text{ ДЖ / г};$$

$$q_{(37)} = -\frac{(\Delta H_{298}^{\circ})_{(37)}}{(\sum M)_{(37)}} = \frac{140700}{79,9 + \frac{2}{3} \cdot 26,98} = 1437 \text{ ДЖ / г};$$

$$q_{(38)} = -\frac{(\Delta H_{298}^{\circ})_{(38)}}{(\sum M)_{(38)}} = \frac{1117800}{231,55 + \frac{8}{3} \cdot 26,98} = 3683 \text{ ДЖ / г}.$$

Загальна термічність шихти буде:

$$q_{(36)} \cdot n_{(36)} + q_{(37)} \cdot n_{(37)} + q_{(38)} \cdot n_{(38)} = 2500, \quad (39)$$

де $n_{(36)}, n_{(37)}, n_{(38)}$ – частка відповідних реакцій за умовою:

$$n_{(36)} + n_{(37)} + n_{(38)} = 1. \quad (40)$$

З урахуванням того, що 50% TiO_2 відновлюється до Ti і стільки ж до TiO , частка цих реакцій однакова, тобто:

$$n_{(36)} = n_{(37)}. \quad (41)$$

Таким чином ми маємо систему із трьох рівнянь (39), (40), (41) з трьома невідомими величинами $n_{(36)}, n_{(37)}, n_{(38)}$.

З двох останніх рівнянь знаходимо:

$$n_{(37)} = n_{(36)}; \quad n_{(38)} = 1 - 2 \cdot n_{(36)}.$$

Підставляючи ці значення в рівняння (39) і вирішуючи його відносно $n_{(36)}$, знаходимо:

$$q_{(36)} \cdot n_{(36)} + n_{(36)} \cdot q_{(37)} + (1 - 2n_{(36)}) \cdot q_{(38)} = 2500;$$

$$n_{(36)} = \frac{2500 - q_{(38)}}{q_{(36)} + q_{(37)} + 2q_{(38)}} = \frac{2500 - 3683}{1496 + 1437 - 2 \cdot 3683} = 0,267;$$

Тоді

$$n_{(37)} = 0,267; \quad n_{(38)} = 1 - 2 \cdot 0,267 = 0,466.$$

Оскільки по першій реакції відновлюється 50% TiO_2 (50 г TiO_2), то загальна маса шихти для реакції (36) буде:

$$m_{(36)} = 50 \cdot \left(1 + \frac{\frac{4}{3} M_{Al}}{(\sum M)_{(36)}} \right) = 50 \cdot \left(1 + \frac{\frac{4}{3} \cdot 26,98}{79,9 + \frac{4}{3} \cdot 26,98} \right) = 65,5 \text{ г}.$$

Для другої реакції, по якій теж відновлюється 50 г. TiO_2 , загальна маса шихти буде:

$$m_{(37)} = 50 \cdot \left(1 + \frac{\frac{2}{3} M_{Al}}{(\sum M)_{(37)}} \right) = 50 \cdot \left(1 + \frac{\frac{2}{3} \cdot 26,98}{79,9 + \frac{2}{3} \cdot 26,98} \right) = 59,2 \text{ г.}$$

Для визначення маси термітної суміші $m_{(38)}$, відповідній реакції (38), залиши-
мо рівняння теплового балансу процесу:

$$q_{(36)} \cdot m_{(36)} + q_{(37)} \cdot m_{(37)} + q_{(38)} \cdot m_{(38)} = 2500m, \quad (42)$$

де m – загальна маса шихти для алюмотермічного процесу, котра дорівнює:

$$m = m_{(36)} + m_{(37)} + m_{(38)}. \quad (43)$$

Усі величини, окрім $m_{(38)}$ і m , відомі.

Тому вирішуючи спільно рівняння (42) і (43) знаходимо:

$$\begin{aligned} m_{(38)} &= \frac{q_{(36)} \cdot m_{(36)} + q_{(37)} \cdot m_{(37)} - 2500 \cdot (m_{(36)} + m_{(37)})}{2500 - q_{(38)}} = \\ &= \frac{1496 \cdot 65,5 + 1437 \cdot 59,2 - 2500 \cdot (65,5 + 59,2)}{2500 - 3683} = 108,78 \text{ г.} \end{aligned}$$

Тоді маса Fe_2O_3 в складі шихти буде:

$$m_{Fe_2O_3} = m_{(38)} \frac{M_{Fe_2O_3}}{(\sum M)_{(38)}} = 108,78 \frac{231,55}{231,55 + \frac{8}{3} \cdot 26,98} = 83 \text{ г.}$$

Кількість відновленого титану буде:

$$m_{Ti} = 50 \cdot \frac{M_{Ti}}{M_{TiO_2}} - 50 \cdot \frac{47,9}{79,9} = 29,97 \text{ г.}$$

Враховуючи, що Fe_3O_4 повністю відновлюється до Fe , кількість відновленого заліза буде:

$$m_{Fe} = 83 \cdot \frac{3 \cdot M_{Fe}}{M_{Fe_3O_4}} = 83 \cdot \frac{3 \cdot 55,85}{231,55} = 60,06 \text{ г.}$$

Вміст титану, що утворився в сплаві з залізом, тобто в феротитані, буде:

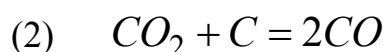
$$[\%Ti] = \frac{m_{Ti}}{m_{Ti} + m_{Fe}} \cdot 100 = \frac{29,97}{29,97 + 60,06} = 33,3\%.$$

Відновлення оксидів металів твердим вуглецем

Відновлення оксидів металів твердим вуглецем відбувається за реакцією:



Цю реакцію можна розглядати як суму двох окремих реакцій:



Оскільки для кожної окремої реакції (1) і (2) газова фаза складається із одних і тих же компонентів (CO і CO_2), умовою загальної рівноваги в системі, тобто умовою рівноваги реакції (3), буде однаковий склад рівноважної газової суміші ($CO - CO_2$) для реакцій (1) і (2).

Рівноважний склад газової суміші ($CO - CO_2$) для реакцій змінюється з температурою, а для реакції (2) ще і зі зміною загального тиску в системі. Для випадку, коли Me , MeO і C являють собою тверді фази і в системі не утворюються розчини, рівновага реакції (3) має одну ступінь свободи. Тому при фіксованому тиску в системі температура, при якій реакція (3) знаходиться у стані рівноваги, має строго визначене значення. Ця температура отримала назву температури початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем. Розвиток цієї реакції в напрямку відновлення металу можливий тільки у тому випадку, коли фактична температура суміші оксиду металу з вуглецем (T) вища за температуру початку відновлення ($T_{n.v.}$).

Метод визначення температури початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем засновано на тому, що температура початку відновлення оксиду відповідає температурі, при якій хімічна спорідненість металу, що відновлюється, до кисню і хімічна спорідненість вуглецю до кисню стають однаковими.

Для умов: $a_{Me} = 1$, $a_{MeO} = 1$, $P = 10^5$ Па, хімічна спорідненість металу і вуглецю до кисню оцінюється величиною ΔG° для реакції утворення MeO і CO :



Рівняння залежності ΔG° від температури для цих реакцій мають вигляд:

$$\Delta G_{MeO}^\circ = M_1 + N_1 T;$$

$$\Delta G_{C/CO}^\circ = M_2 + N_2 T.$$

Значення температури початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем може бути знайдене аналітичним шляхом, якщо прирівняти праві частини рівнянь (45) і (46):

$$M_1 + N_1 T = M_2 + N_2 T,$$

Тоді

$$T_{n.v.} = \frac{(M_2 - M_1)}{(N_1 - N_2)}. \quad (47)$$

Значення коефіцієнтів M_1 , M_2 , N_1 , і N_2 вибираються з таблиць температурної залежності ΔG° для відповідних реакцій. Рівняння для ΔG° реакцій утворення MeO і CO повинні бути записані в розрахунку на 1 моль O_2 . Значення коефіцієнтів в рівняннях температурної залежності для ΔG° змінюються при фазових та поліморфних перетвореннях металу і оксиду. Тому для розрахунків треба вибирати значення коефіцієнтів M і N для відповідного температурного інтервалу.

Доцільно попередньо визначити орієнтувальні значення температур початку відновлення заданих оксидів, використовуючи Рис.2, на якому наведено залежність ΔG_{MeO}° і $\Delta G_{C/CO}^\circ$ від температури для деяких металів.

Дуже часто реакція відновлення оксидів металів твердим вуглецем розвивається в умовах, які відрізняються від стандартних. Метал, що відновлюється, часто переходить в розчин і тоді активність металу в системі стає менше одиниці. Відновлюваний оксид теж може перебувати в розчині, тоді $a_{MeO} < 1$. В системі може мати місце утворення хімічних сполук, в цьому разі активність металу і оксиду також змінюється. Тиск оксиду вуглецю в системі також не завжди дорівнює 10^5 Па, бо процес відновлення може здійснюватися у вакуумі або при підвищеному тиску. Ці обставини змінюють хімічну спорідненість металу і вуглецю до кисню. Для кількісної оцінки міцності оксидів в нестандартних умовах треба використовувати значення кисневих потенціалів.

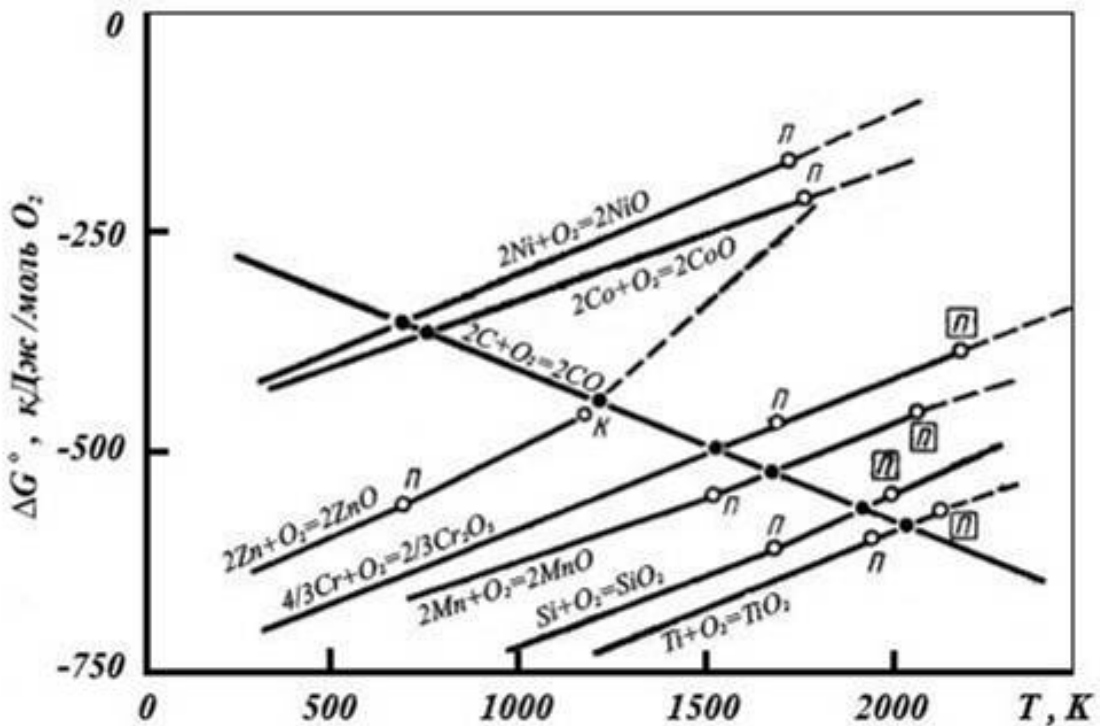


Рис.2. Температурна залежність ΔG_{MeO}° і $\Delta G_{C/CO}^\circ$ для реакцій утворення деяких оксидів.

При наявності твердого вуглецю в системі кисневий потенціал газової фази залежить від температури і тиску в системі

$$\pi_{o_{(г.ф.)}} = \pi_{o_{(C/CO)}} = f(T, P).$$

Вигляд цієї залежності встановлюється за умов рівноваги реакції утворення CO із вуглецю і кисню:

$$\pi_{o_{(C/CO)}} = \Delta G_{C/CO}^\circ + 2RT \ln P_{CO} - 2RT \ln a_C. \quad (48)$$

Приймаємо, що в реакції бере участь чистий вуглець у формі графіту, тобто $a_C = 1$.

У зв'язку з дуже низьким тиском кисню в системі можна припустити, що $P_{CO} = P$, тоді

$$\pi_{o_{(C/CO)}} = \Delta G_{C/CO}^\circ + 38,31T \lg P. \quad (49)$$

Взагалі, при утворенні оксиду Me_xO_y , кисневий потенціал такого оксиду дорівнює (в розрахунку на моль O_2):

$$2\frac{x}{y}Me + O_2 = \frac{2}{y}Me_xO_y; \quad (50)$$

$$\pi_{o_{(Me_xO_y)}} = \Delta G_{Me_xO_y}^\circ - 38,31\frac{x}{y}T \lg a_{[Me]} + \frac{38,31}{y}T \lg a_{(Me_xO_y)}.$$

Температура початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем визначається із умов рівності кисневих потенціалів оксиду і газової фази з CO в присутності твердого вуглецю:

$$\pi_{o_{(Me_xO_y)}} = \pi_{o_{(C/CO)}}.$$

З урахуванням того, що рівняння температурної залежності для $\Delta G_{Me_xO_y}^\circ$ і $\Delta G_{C/CO}^\circ$ мають вигляд:

$$\Delta G_{Me_xO_y}^\circ = M_1 + N_1T; \quad \Delta G_{C/CO}^\circ = M_2 + N_2T,$$

маємо кінцеву формулу для розрахунку температури початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем в умовах утворення розчинів і тиску P в системі, який відрізняється від 10^5 Па:

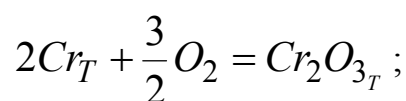
$$T_{n.в.} = \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 + 38,31 \left(\frac{1}{y} \lg a_{(Me_xO_y)} - \frac{x}{y} \lg a_{[Me]} - \lg P \right)}. \quad (51)$$

Приклад 7. визначити температуру початку відновлення оксиду Cr_2O_3 твердим вуглецем для значень загального тиску в системі $P_1=10^5$ Па і $P_2=0,12 \cdot 10^5$ Па і наступних значень активності металу і оксиду:

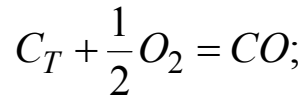
- 1) $a_{Cr} = 1; a_{Cr_2O_3} = 1;$
- 2) $a_{Cr} = 0,15; a_{Cr_2O_3} = 1;$
- 3) $a_{Cr} = 1; a_{Cr_2O_3} = 0,15.$

Активність вуглецю прийняти рівній одиниці. Не враховувати процес утворення карбіду хрому.

Рішення. З графіка (рис.2) знаходимо, що для чистих речовин, що реагують, і тиску $P=10^5$ Па температура початку відновлення Cr_2O_3 вуглецем складає близько 1550 К. Тому з Додатку Б вибираємо наступні рівняння температурної залежності для $\Delta G_{Cr_2O_3}^\circ$ і $\Delta G_{C/CO}^\circ$:



$$\Delta G^\circ = -1110884 + 247,48T; (1173 - 1923K).$$



$$\Delta G^\circ = -1110560 - 89,875T; (773 - 2273K).$$

Розрахуємо коефіцієнти в рівняннях для температурної залежності ΔG° на один моль O_2 :

$$\Delta G_{Cr_2O_3}^\circ = -740589 + 165T \text{ Дж / моль } O_2;$$

$$\Delta G_{C/CO}^\circ = -221120 - 179,75T \text{ Дж / моль } O_2.$$

Звідки знаходимо відповідні значення коефіцієнтів M і N для розрахунку за формулою (51):

$$M_1 = -740589; M_2 = -221120; N_1 = 165; N_2 = 179,75.$$

Значення коефіцієнтів x і y для оксиду Cr_2O_3 наступні:

$$x = 2; \quad y = 3.$$

Далі виконуємо розрахунки для різних умов відновлення:

$$I) \quad p = 10^5 \text{ Па}; \quad a_{Cr} = 1,0; \quad a_{Cr_2O_3} = 1.$$

Для цих умов розрахунок ведемо за формулою (47):

$$T_{n.в.} = \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2} = \frac{-221120 - (-740589)}{165 - (-179,75)} = \frac{519469}{344,75} = 1507 \text{ К}$$

$$II) \quad p = 0,12 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad a_{Cr} = 1,0; \quad a_{Cr_2O_3} = 1.$$

В порівнянні з попередніми умовами значно знижений тиск в системі. В цьому випадку розрахунок ведемо з використання формули (51).

Оскільки активності компонентів дорівнюють одиниці, формула (51) значно спрощується:

$$T_{n.в.} = \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 - 38,31 \lg P} = \frac{-221120 - (-740589)}{165 - (-179,75) - 38,31 \lg 0,12} = 1367 \text{ К}.$$

Таким чином, зниження тиску і системі знижує температуру початку відновлення оксиду твердим вуглецем.

$$III) \quad p = 10^5 \text{ Па}; \quad a_{Cr} = 0,15; \quad a_{Cr_2O_3} = 1,0.$$

В цих умовах значно знижена активність металу в системі. Температура початку відновлення і цьому випадку дорівнюватиме:

$$\begin{aligned} T_{n.в.} &= \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 - 38,31(x/y) \lg a_{[Cr]}} = \\ &= \frac{-221120 - (-740589)}{165 - (-179,75) - 38,31 \cdot 2/3 \cdot \lg 0,15} = 1420 \text{ К} \end{aligned}$$

Таким чином, зниження активності металу в системі (наприклад, перехід відновленого хрому в розчин) знижує температуру початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем.

$$IV) \quad p = 0,12 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad a_{Cr} = 0,15; \quad a_{Cr_2O_3} = 1,0.$$

В цьому варіанті умов одночасно знижено тиск і активність хрому і системі. Температура початку відновлення в цьому випадку:

$$\begin{aligned} T_{n.в.} &= \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 - 38,31(x/y) \lg a_{[Cr]} - 38,31 \lg P} = \\ &= \frac{-221120 - (-740589)}{165 - (-179,75) - 38,31 \cdot 2/3 \cdot \lg 0,15 - 38,31 \cdot \lg 0,12} = 1295 \text{ К.} \end{aligned}$$

Таким чином, сумісний вплив зниження тиску в системі і зниження активності сприяє більш значному зниженню температури початку відновлення в порівнянні з впливом кожного із цих факторів, коли вони діють окремо.

$$V) \quad p = 10^5 \text{ Па}; \quad a_{Cr} = 1,0; \quad a_{Cr_2O_3} = 0,15.$$

В цьому випадку температура початку відновлення буде

$$\begin{aligned} T_{n.в.} &= \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 - 38,31(1/y) \lg a_{(Cr_2O_3)}} = \\ &= \frac{-221120 - (-740589)}{165 - (-179,75) - 38,31 \cdot 1/3 \cdot \lg 0,15} = 1554 \text{ К} \end{aligned}$$

Таким чином, зниження активності оксиду в системі (наприклад, внаслідок його розчинення у шлаці) підвищує температуру початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем.

$$VI) \quad p = 0,12 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad a_{Cr} = 1,0; \quad a_{Cr_2O_3} = 0,15.$$

В цьому випадку розглядається вплив зниження тиску в системі і одночасно зниження активності оксиду, який відновлюється. Температура початку відновлення в цьому випадку

$$\begin{aligned} T_{n.в.} &= \frac{M_2 - M_1}{N_1 - N_2 - 38,31 \cdot (1/y) \cdot \lg a_{(Cr_2O_3)} - 38,31 \lg P} = \\ &= \frac{-221120 - (-740589)}{165 - (-179,75) - 38,31 \cdot 1/3 \cdot \lg 0,15 - 38,31 \cdot \lg 0,12} = 1406 \text{ К.} \end{aligned}$$

Таким чином, незважаючи на значне зниження активності оксиду в системі, температура початку відновлення твердим вуглецем виявилася нижче, аніж для умов (I). Це пов'язано з тим, що відновлення розглядалося при низькому тиску, що сприяє значному зниженню температури початку відновлення.

Результати розрахунків температури початку відновлення твердим вуглецем для різних умов зводимо в табл. 3.

Таблиця 3. – Результати розрахунків температури початку відновлення Cr_2O_3 твердим вуглецем для різних умов.

Варіанти умов відновлення	Вихідні параметри			Розрахункова температура початку відновлення, К
	$P, (Па) \cdot 10^5$	a_{Cr}	$a_{Cr_2O_3}$	
<i>I</i>	1,0	1,0	1,0	1507
<i>II</i>	0,12	1,0	1,0	1367
<i>III</i>	1,0	0,15	1,0	1420
<i>IV</i>	0,12	0,15	1,0	1295
<i>V</i>	1,0	1,0	0,15	1554
<i>VI</i>	0,12	1,0	0,15	1406

Виконуємо розрахунки значень кисневих потенціалів $\pi_{o_{(Cr_2O_3)}}$ і $\pi_{o_{(C/CO)}}$ для кожного варіанта умов відновлення. Оскільки для температури початку відновлення виконується умова $\pi_{o_{(Cr_2O_3)}} = \pi_{o_{(C/CO)}}$, то достатньо визначити значення одного з цих кисневих потенціалів, наприклад $\pi_{o_{(C/CO)}}$. Величина його відповідно рівнянню (49) визначається:

$$\pi_{o_{(C/CO)}} = \Delta G_{C/CO}^{\circ} + 38,31T \lg P = -221120 - 179,75T + 38,31T \lg P.$$

Підставляючи в це рівняння температуру початку відновлення з табл. 3 і відповідні значення тиску, отримаємо величини кисневих потенціалів для шести випадків, які було розглянуто:

$$\begin{aligned} (\pi_{o_{(C/CO)}})_1 &= -492003 \text{ Дж / моль } O_2; & (\pi_{o_{(C/CO)}})_4 &= -499579 \text{ Дж / моль } O_2 \\ (\pi_{o_{(C/CO)}})_2 &= -515061 \text{ Дж / моль } O_2; & (\pi_{o_{(C/CO)}})_5 &= -500452 \text{ Дж / моль } O_2 \\ (\pi_{o_{(C/CO)}})_3 &= -476365 \text{ Дж / моль } O_2; & (\pi_{o_{(C/CO)}})_6 &= -523447 \text{ Дж / моль } O_2 \end{aligned}$$

З урахуванням значень температури початку відновлення і відповідних значень кисневих потенціалів, будемо графік (рис. 3), який наочно відображає залежність від температури кисневого потенціалу $\pi_{o_{(Cr_2O_3)}}$ для різних значень активностей $a_{[Cr]}$ і $a_{(Cr_2O_3)}$, а також кисневого потенціалу $\pi_{o_{(C/CO)}}$ для різного тиску (пунктирні лінії). Точки пересічення безперервних і пунктирних ліній відповідають значенням температур початку відновлення Cr_2O_3 для заданих умов.

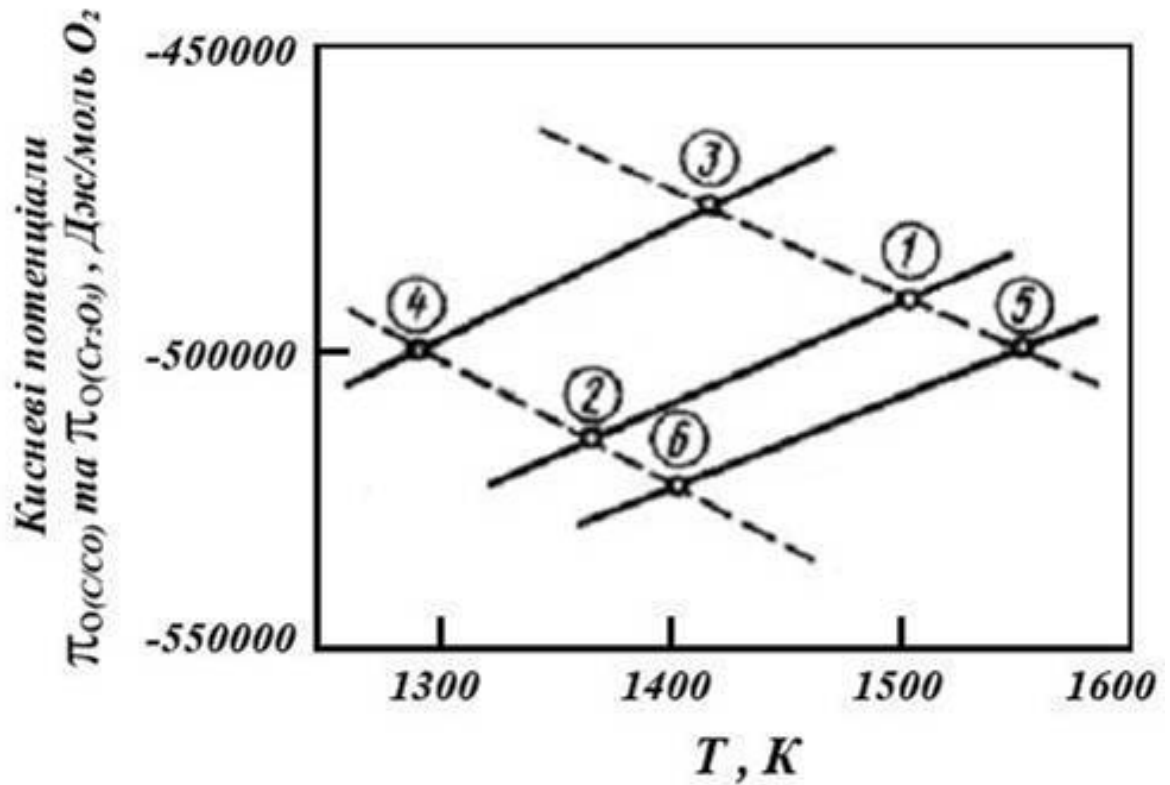


Рис.3. Зміна кисневих потенціалів $\pi_{o(Cr_2O_3)}$ (—) і $\pi_{o(C/CO)}$ (- - -) з температурою. Точки пересічення відповідають температурам початку відновлення для варіантів умов, які наведено і табл. 3.

Варіанти завдань

Варіант	<i>Завдання 1</i>	
	Визначити температуру, при котрій пружність дисоціації карбонату дорівнюватиме заданому тиску.	
	Карбонат	Тиск, Па×10 ⁵
1.	BaCO ₃ (тв.)	1,0
2.	CaCO ₃ (тв.)	1,0
3.	Li ₂ CO ₃ (р.)	1,0
4.	MgCO ₃ (тв.)	1,0
5.	Na ₂ CO ₃ (тв.)	1,0
6.	Na ₂ CO ₃ (р.)	1,0
7.	Rb ₂ CO ₃ (тв.)	1,0
8.	SrCO ₃ (тв.)	1,0
9.	BaCO ₃ (тв.)	1,2
10.	CaCO ₃ (тв.)	0,5
11.	Li ₂ CO ₃ (р.)	1,2
12.	MgCO ₃ (тв.)	1,2
13.	Na ₂ CO ₃ (тв.)	1,2
14.	Na ₂ CO ₃ (р.)	1,2
15.	Rb ₂ CO ₃ (тв.)	1,2
16.	SrCO ₃ (тв.)	1,2
17.	BaCO ₃ (тв.)	0,5
18.	CaCO ₃ (тв.)	1,1
19.	Li ₂ CO ₃ (р.)	0,5
20.	MgCO ₃ (тв.)	0,5
21.	Na ₂ CO ₃ (тв.)	0,5
22.	Na ₂ CO ₃ (р.)	0,5
23.	Rb ₂ CO ₃ (тв.)	0,5
24.	SrCO ₃ (тв.)	0,5
25.	BaCO ₃ (тв.)	0,5

Варіант	Завдання 2
	Визначити пружність дисоціації оксиду для температур 900, 1000, 1100, 1200 К ентропій ним методом.
1.	Al_2O_3
2.	B_2O_3
3.	BaO
4.	BeO
5.	CaO
6.	CdO
7.	Ge_2O_3
8.	CeO_2
9.	CoO
10.	Cr_2O_3
11.	CuO
12.	K_2O
13.	MgO
14.	MoO_2
15.	NiO
16.	PbO
17.	Pb_3O_4
18.	SiO_2
19.	SnO_2
20.	TaO
21.	TiO_2
22.	V_2O_5
23.	WO_3
24.	ZnO
25.	ZrO_2

Варіант	Завдання 3	
	Розрахувати ентропійним методом рівноважний тиск сірки для утворення сульфїду при заданій температурі.	
	Сульфїд	Температура, К
1.	Ag ₂ S	1000
2.	BaS	1000
3.	BaS	1500
4.	CaS	1200
5.	CoS ₂	600
6.	CrS	1400
7.	Cu ₂ S	1000
8.	CuS	500
9.	MgS	800
10.	MgS	1500
11.	MoS ₂	1000
12.	NiS	600
13.	PbS	1000
14.	SnS ₂	1000
15.	US	1500
16.	U ₂ S ₃	1600
17.	US ₂	1500
18.	ZnS	1000
19.	ZrS	1500
20.	ZrS ₂	1000
21.	CeS	1500
22.	GaS	1000
23.	Ga ₂ S ₃	1000
24.	K ₂ S	800
25.	LaS	1300

Варіант	<i>Завдання 4</i>	
	Визначити значення константи рівноваги реакції відновлення оксиду воднем і рівноважний вміст водню у газовій суміші $H_2 - H_2O$ при заданій температурі.	
	Оксид	Температура, К
1.	Al_2O_3	1500
2.	B_2O_3	2000
3.	BaO	1500
4.	BeO	1000
5.	CaO	1500
6.	CdO	1000
7.	Ge_2O_3	1000
8.	CeO_2	1000
9.	CoO	1500
10.	Cr_2O_3	1500
11.	CuO	1000
12.	K_2O	600
13.	MgO	600
14.	MoO_2	2000
15.	NiO	1500
16.	PbO	1000
17.	Pb_3O_4	1000
18.	SiO_2	1300
19.	SnO_2	1500
20.	TaO	1500
21.	TiO_2	1500
22.	V_2O_5	1500
23.	WO_3	1500
24.	ZnO	1500
25.	ZrO_2	1500

Варіант	Завдання 5			
	Визначити температуру початку відновлення оксиду твердим вуглецем при заданих параметрах (активність вуглецю прийняті рівній одиниці).			
	Оксид	Параметри		
$P, \text{Па} \times 10^5$		a_{Me}	a_{MeO}	
1.	Cr_2O_3	1,0	1,0	1,0
2.	Cr_2O_3	1,0	0,2	0,5
3.	Cr_2O_3	0,1	0,5	1,0
4.	Cr_2O_3	0,5	0,7	0,8
5.	Cr_2O_3	0,9	0,5	0,5
6.	NiO	1,0	1,0	1,0
7.	NiO	1,0	0,2	0,5
8.	NiO	0,1	0,5	1,0
9.	NiO	0,5	0,7	0,8
10.	NiO	0,9	0,5	0,5
11.	MoO_2	1,0	1,0	1,0
12.	MoO_2	1,0	0,2	0,5
13.	MoO_2	0,1	0,5	1,0
14.	MoO_2	0,5	0,7	0,8
15.	MoO_2	0,9	0,5	0,5
16.	V_2O_5	1,0	1,0	1,0
17.	V_2O_5	1,0	0,2	0,5
18.	V_2O_5	0,1	0,5	1,0
19.	V_2O_5	0,5	0,7	0,8
20.	V_2O_5	0,9	0,5	0,5
21.	WO_3	1,0	1,0	1,0
22.	WO_3	1,0	0,2	0,5
23.	WO_3	0,1	0,5	1,0
24.	WO_3	0,5	0,7	0,8
25.	WO_3	0,9	0,5	0,5

ДОДАТКИ

Додаток А

Форма титульного листа (формат А-4)

**Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
Донецький національний технічний університет**

Кафедра КМіКМ

КУРСОВА РОБОТА
з дисципліни „Теорія пірометалургійних процесів”

Виконавець: _____

Студент групи МКМ - 04
Іванов І.І.

Консультант:
проф. дтн. Маняк М.О.

2007

Додаток Б

Зміна енергії Гіббса
для реакцій утворення сполук із компонентів
у стандартному стані

Реакція	$AG^\circ = M+NT$		Межі температури, К
	M , Дж	N , Дж/К	
<i>Оксиди</i>			
$2Al_{ж} + 3/2O_2 = Al_2O_3$	- 1687909	325,15	932 – 2303
$2Al_{ж} + 1/2O_2 = Al_2O$	- 170821	- 49,40	933 – 2273
$2Al_{ж} + O_2 = Al_2O_2$	- 47102	28,88	933 – 2273
$2B_T + 3/2O_2 = B_2O_3$	- 1246410	221,36	723 – 2300
$B_T + 1/2O_2 = BO$	- 3806	- 88,84	298 – 2303
$Ba_{ж} + 1/2O_2 = BaO_T$	- 557933	94,83	983 – 1910
$Be_T + 1/2O_2 = BeO_T$	- 598796	96,88	298 – 1556
$Be_{ж} + 1/2O_2 = BeO_T$	- 606249	101,70	1556 – 2768
$2Bi_{ж} + 3/2O_2 = Bi_2O_{3ж}$	- 592348	295,71	544 – 1090
$C_T + 1/2O_2 = CO$	- 110560	- 89,875	773 – 2273
$C_T + O_2 = CO_2$	- 393260	- 2,29	773 – 2273
$CO + 1/2O_2 = CO_2$	- 282695	87,585	773 – 2273
$C_T + CO_2 = 2CO$	172130	- 177,46	773 – 2273
$Ca_{ж} + 1/2O_2 = CaO_T$	- 641836	110,20	1123 – 1765
$Cd_{ж} + 1/2O_2 = CdO_T$	- 278841	114,72	594 – 1040
$2Ge_T + 3/2O_2 = Ge_2O_{3T}$	- 1789229	286,80	298 – 1071
$Ce_T + O_2 = CeO_{2T}$	- 1084381	211,98	298 – 1071
$Ce_{ж} + O_2 = CeO_{2T}$	-1078101	217,71	1077 – 2000
$Co_T + 1/2O_2 = CoO_T$	- 237308	72,72	298 – 1766
$Co_{ж} + 1/2O_2 = CoO_T$	- 261884	85,83	1766 – 2100
$3Co_T + 2O_2 = Co_3O_{4T}$	- 957940	457,24	298 – 973
$2Cr_T + 3/2O_2 = Cr_2O_{3T}$	- 1110884	247,48	1173 – 1923
$3Cr_T + 2O_2 = Cr_3O_{4T}$	- 1356104	264,82	1923 – 1938
			(ПЛ)
$Cr_T + 1/2O_2 = CrO_{ж}$	- 334442	63,85	1938 – 2023
$2Cu_T + 1/2O_2 = Cu_2O_T$	- 168519	71,30	298 – 1356
$2Cu_{ж} + 1/2O_2 = Cu_2O_{ж}$	- 146605	50,41	1502 – 2820
$Cu_T + 1/2O_2 = CuO_T$	- 159852	91,02	298 – 1356
$Fe_\alpha + 1/2O_2 = FeO_T$	- 262387	63,56	843 – 1181
$Fe_\gamma + 1/2O_2 = FeO_T$	- 263182	64,22	1184 – 1650
$Fe_{\gamma,\delta} + 1/2O_2 = FeO_{ж}$	- 228934	43,46	1650 – 1809

Реакція	$AG^\circ = M+NT$		Межі температури, К
	M , Дж	N , Дж/К	
$Fe_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = FeO_{ж}$	- 239987	49,57	1809 – 3000
$3Fe_T + 2O_2 = Fe_3O_{4T}$	- 1105608	307,31	843 – 1809
$3FeO_T + \frac{1}{2}O_2 = Fe_3O_{4T}$	- 318065	127,84	298 – 1184
$2Fe_T + \frac{3}{2}O_2 = Fe_2O_{3T}$	- 814374	248,82	298 – 1809
$\frac{3}{2}Fe_3O_{4T} + \frac{1}{6}O_2 = Fe_2O_{3T}$	- 97795	56,7	298 – 1809
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	- 246115	54,12	400 – 3000
$Hf_\alpha + O_2 = HfO_{2T}$	- 1102259	174,25	1000 – 1973
$Hf_\beta + O_2 = HfO_{2T}$	- 1083921	164,96	1973 – 2495
$2K_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = K_2O_T$	- 367224	157,88	336 – 1030
$2La_T + \frac{3}{2}O_2 = La_2O_{3T}$	- 1789522	304,00	298 – 1153
$2Li_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = Li_2O_T$	- 578825	135,86	500 – 1500
$Mg_T + \frac{1}{2}O_2 = MgO_T$	- 601350	107,39	298 – 923
$Mg_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = MgO_T$	- 609350	116,06	923 – 1376
$Mg + \frac{1}{2}O_2 = MgO_T$	- 728085	202,35	1376 – 3098
$Mn_T + \frac{1}{2}O_2 = MnO_T$	- 385186	73,73	298 – 1517
$3Mn_T + 2O_2 = Mn_3O_{4T}$	- 1385412	350,60	298 – 1516
$3MnO_T + \frac{1}{2}O_2 = Mn_3O_{4T}$	- 232267	117,06	1198 – 1813 (пл)
$2Mn_T + \frac{3}{2}O_2 = Mn_2O_{3T}$	- 959070	259,54	298 – 1516
$\frac{2}{3}Mn_3O_{4T} + \frac{1}{6}O_2 = Mn_2O_{3T}$	- 35085	28,09	1073 – 1273
$Mn_T + O_2 = MnO_{2T}$	- 518954	177,19	298 – 1516
$Mo_T + O_2 = MoO_{2T}$	- 584435	170,61	298 – 2500
$Mo_T + O_2 = MoO_{2Tж}$	- 545435	142,14	2500 – 2880
$Mo_T + \frac{3}{2}O_2 = MoO_{3T}$	- 742194	247,10	298 – 1070
$Mo_T + \frac{3}{2}O_2 = MoO_3$	- 664948	182,96	1070 – 1500
$\frac{1}{2}N_2 + \frac{1}{2}O_2 = NO$	90477	12,69	298 – 2273
$\frac{1}{2}N_2 + O_2 = NO_2$	32322	63,30	298 – 2273
$2Na_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = Na_2O_T$	- 421401	147,12	371 – 1405 (пл)
$2Na + \frac{1}{2}O_2 = Na_2O_{ж}$	- 519163	243,88	1405 – 2223 (пл)
$Nb_T + \frac{1}{2}O_2 = NbO_T$	- 402067	81,10	1000 – 2218
$2Nb_T + \frac{5}{2}O_2 = Nb_2O_{5T}$	- 1874539	410,89	1000 – 1785
$Nb_T + O_2 = NbO_{2T}$	- 773302	160,15	1000 – 2270
$Ni_T + \frac{1}{2}O_2 = NiO_T$	- 234503	85,28	298 – 1725
$Ni_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = NiO_T$	- 262303	108,77	1725 – 2200
$\frac{1}{2}P_2 + \frac{1}{2}O_2 = PO$	- 77860	- 11,60	298 – 1973
$\frac{1}{2}P_2 + O_2 = PO_2$	- 386023	16,29	298 – 1973

Реакція	$AG^\circ = M+NT$		Межі температури, К
	M, Дж	N, Дж/К	
$4P_{кр} + 5O_2 = P_4O_{10}$	- 2858915	699,61	631 – 704
$P_4 + 5O_2 = P_4O_{10}$	- 3163965	975,94	1000 – 2000
$Pb_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = PbO_T$	- 218676	97,8	600 – 1159
$Pb_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = PbO_{ж}$	- 184931	69,08	1159 – 1765
$3Pb_{ж} + 2O_2 = Pb_3O_{4T}$	- 702964	369,19	601 – 1473
$Pb_{ж} + O_2 = PbO_{2T}$	- 27256	193,81	601 – 1173
$2Rb_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = Rb_2O_T$	- 336116	145,07	312 – 910
$\frac{1}{2}S_2 + \frac{1}{2}O_2 = SO$	- 64351	- 5,02	800 – 3000
$\frac{1}{2}S_2 + O_2 = SO_2$	- 357134	72,52	800 – 3000
$\frac{1}{2}S_2 + \frac{3}{2}O_2 = SO_3$	- 458203	163,45	718 – 2273
$2Sb_{ж} + \frac{3}{2}O_2 = Sb_2O_{3ж}$	- 653559	216,96	928 – 1698
$Si_T + \frac{1}{2}O_2 = SiO$	- 104251	- 82,56	298 – 1685
$Si_T + O_2 = SiO_2 \alpha\text{-кварц}$	- 912237	180,74	298 – 848
$Si_T + O_2 = SiO_2 \alpha\text{-кварц}$	- 906555	174,05	848 – 1298
	- 902536	170,95	1298 – 1690
$Si_T + O_2 = SiO_{2T} \text{ – кристобалит}$	- 906442	175,64	298 – 1685
$5Sn_{ж} + O_2 = SnO_{2T}$	- 581756	204,82	505 – 1898
$Sr_{ж} + \frac{1}{2}O_2 = SrO_T$	- 596347	103,46	1045 – 1640
$Ta_T + \frac{1}{2}O_2 = TaO$	188406	- 86,67	298 – 2273
$Ta_T + O_2 = TaO_2$	- 209340	- 20,52	298 – 2273
$Ta_T + \frac{5}{2}O_2 = Ta_2O_{5T}$	- 2007152	401,56	1000 – 2150
$Th_T + \frac{1}{2}O_2 = ThO$	- 66989	- 52,75	1873 – 2273
$Th_T + O_2 = ThO_{2T}$	- 1226732	180,03	1000 – 2028
$Ti_T + \frac{1}{2}O_2 = TiO_{\beta T}$	- 511208	80,60	1000 – 1950
$Ti_T + O_2 = TiO_{2T} \text{ – рутил}$	- 939535	175,76	1000 – 1950
$2Ti_T + \frac{3}{2}O_2 = Ti_2O_{3T}$	- 1495106	251,21	1000 – 1950
$3Ti_T + \frac{5}{2}O_2 = Ti_3O_{5T}$	- 2417004	414,41	1000 – 1950
$U_{ж} + O_2 = UO_{2T}$	- 1089866	174,21	1406 – 3000
$4U_T + \frac{9}{2}O_2 = U_4O_{9T}$	- 4494948	740,69	298 – 873
$3U_T + 4O_2 = U_3O_{8T}$	- 3562966	652,97	298 – 873
$U_T + \frac{3}{2}O_2 = UO_{3T}$	- 1227569	250,71	298 – 873
$V_T + \frac{1}{2}O_2 = VO_T$	- 415666	81,18	298 – 2000
$2V_T + \frac{3}{2}O_2 = V_2O_{3T}$	- 1231129	239,61	298 – 2185
$V_T + O_2 = VO_{2T}$	- 706732	155,41	298 – 1633
			(пл)
$2V + \frac{5}{2}O_2 = V_2O_{5ж}$	- 1464417	325,31	943 – 2185
$W_T + O_2 = WO_{2T}$	- 585440	171,95	298 – 2000
$W_T + \frac{3}{2}O_2 = WO_{3T}$	- 837821	245,68	298 – 1745

Реакція	$AG^\circ = M+NT$		Межі температури, К
	M , Дж	N , Дж/К	
$2Y_T + 3/2O_2 = Y_2O_{3T}$	1897709	298,35	298 – 1803
	1903236	324,64	1803 – 2000
$Zn + 1/2O_2 = ZnO_T$	- 493666	203,98	1180 – 2248
$Zr_T + 1/2O_2 = ZrO$	54596	- 67,16	1573 – 2123
$Zr_T + O_2 = ZrO_{2T}$	- 1092754	183,80	298 – 2123
Карбонати			
$BaO_{(T)} + CO_2 = BaCO_{3(T)}$	- 250915	147,17	1073 – 1333
$CaO_{(T)} + CO_2 = CaCO_{3(T)}$	- 170577	144,19	973 – 1473
$Li_2O_{(T)} + CO_2 = Li_2CO_{3(ж)}$	- 147962	78,80	993 – 1843
$MgO_{(T)} + CO_2 = MgCO_{3(T)}$	- 110825	120,16	298 – 1000
$Na_2O_{(T)} + CO_2 = Na_2CO_{3(T)}$	- 297263	118,28	298 – 1123
$Na_2O_{(ж)} + CO_2 = Na_2CO_{3(ж)}$	- 316564	130,92	1405 – 2273
$Rb_2O_{(T)} + CO_2 = Rb_2CO_{3(T)}$	- 401933	145,70	298 – 873
$SrO_{(T)} + CO_2 = SrCO_{3(T)}$	- 214783	141,68	973 – 1516 (р)
Сульфіди			
$2Ag_{(T)} + 1/2S_2 = Ag_2S_{(T)}$	- 161359	168,69	298 – 1102 (пл)
$Ba_{(ж)} + 1/2S_2 = BaS_{(T)}$	- 544284	123,51	1002 – 1895
$Be_{(T)} + 1/2S_2 = BeS_{(T)}$	- 297263	86,67	298 – 1560
$2Bi_{(ж)} + 3/2S_2 = Bi_2S_{3(T)}$	- 360065	274,24	545 – 1050 (пл)
$Ca_{(ж)} + 1/2S_2 = CaS_{(T)}$	- 548471	103,92	1112 – 1757
$Cd_{(ж)} + 1/2S_2 = CdS_{(T)}$	- 215620	97,26	644 – 1040
$Ce_{(ж)} + 1/2S_2 = CeS_{(T)}$	- 535241	91,02	1071 – 2723 (пл)
$9Co_{(T)} + 4S_2 = Co_9S_{8(T)}$	- 1327048	666,71	298 – 1061
$4Co_{(T)} + 3/2S_2 = Co_4S_{3(T)}$	- 388744	146,41	1061 – 1150
$Co_{(T)} + S_2 = Co_{2(T)}$	- 280516	182,55	298 – 873
$Cr_{(T)} + 1/2S_2 = CrS_{(T)}$	- 202641	56,10	1373 – 1573
$2Cu_{(T)} + 1/2S_2 = Cu_2S_{(T),\gamma}$	- 140802	43,38	298 – 708
$2Cu_{(T)} + 1/2S_2 = Cu_2S_{(T)}$	- 131884	30,82	708 – 1402 (пл)
$2Cu_{(T)} + 1/2S_2 = CuS_{(T)}$	- 115681	76,12	298 – 703
$Cu_{(T)} + Fe_{(T)} + S_2 = CuFeS_{2(T)}$	- 278799	115,39	830 – 973
$Fe_{(a)} + 1/2S_2 = FeS_{(T)}$	- 150350	52,58	412 – 1179
$Fe_{(y)} + 1/2S_2 = FeS_{(T)}$	- 151020	53,34	1179 – 1261

Реакція	$AG^\circ = M+NT$		Межі температури, К
	M , Дж	N , Дж/К	
$Ga_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = GaS_{(т)}$	- 276329	110,95	303 – 1233
$2Ga_{(ж)} + \frac{3}{2}S_2 = Ga_2S_{3(т)}$	- 720130	318,62	303 – 1363
$H_2 + \frac{1}{2}S_2 = H_2S$	- 91691	50,62	298 – 2273
$2K_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = K_2S_{(т)}$	- 481482	143,61	298 – 1032
$La_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = LaS_{(т)}$	- 527537	104,25	1193 – 1773
$2La_{(ж)} + \frac{3}{2}S_2 = La_2S_{3(т)}$	- 1419325	285,96	1193 – 1773
$2La_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = La_2S_{(т)}$	- 514876	121,42	454 – 1273
$Mg_{(т)} + \frac{1}{2}S_2 = MgS_{(т)}$	- 409888	94,45	298 – 922
$Mg + \frac{1}{2}S_2 = MgS_{(т)}$	- 540097	193,18	1363 – 1973
$Mn_{(т)} + \frac{1}{2}S_2 = MnS_{(т)}$	- 296719	76,69	973 – 1473
$2Mo_{(т)} + \frac{3}{2}S_2 = Mo_2S_{3(т)}$	- 594526	265,44	298 – 1473
$Mo_{(т)} + S_2 = MoS_{2(т)}$	- 397746	182,13	298 – 1458 (пл)
$2Na_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = Na_2S_{(т)}$	- 439614	144,03	371 – 1251
$3Ni_{(т)} + S_2 = Ni_3S_{2(т)}$	- 331762	163,33	298 – 1063 (пл)
$Ni_{(т)} + \frac{1}{2}S_2 = NiS_{(т)}$	- 146454	72,01	298 – 773
$Pb_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = PbS_{(т)}$	- 163285	88,09	601 – 1386
$Si_{(т)} + \frac{1}{2}S_2 = SiS$	51791	- 81,64	973 – 1685
$Si_{(т)} + S_2 = SiS_{2(т)}$	- 326570	- 139,04	298 – 1363
$Sn_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = SnS$	25958	- 49,40	505 – 1973
$Sn_{(ж)} + S_2 = SnS_{2(т)}$	- 284702	195,94	505 – 1038 (пл)
$Th_{(т)} + \frac{1}{2}S_2 = ThS_{(т)}$	- 463060	94,71	298 – 2273
$2Th_{(т)} + \frac{3}{2}S_2 = Th_2S_{3(т)}$	- 1268600	256,65	298 – 2273
$Th_{(т)} + S_2 = ThS_{2(т)}$	- 749437	171,66	298 – 2188 (пл)
$U_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = US_{(т)}$	- 392722	103,92	1405 – 2733 (пл)
$2U_{(ж)} + \frac{3}{2}S_2 = U_2S_{3(т)}$	- 1038326	266,28	1405 – 2303 (пл)
$U_{(ж)} + S_2 = US_{2(т)}$	- 598712	169,98	1405 – 1973
$Zn_{(ж)} + \frac{1}{2}S_2 = ZnS_{(т)}$	- 278004	108,02	697 – 1180
$Zn + \frac{1}{2}S_2 = ZnS$	5024	30,56	1455 – 1973
$Zr_{(т)} + \frac{1}{2}S_2 = ZrS$	237392	- 78,29	298 – 2123
$Zr_{(т)} + S_2 = ZrS_{2(т)}$	- 699196	178,36	298 – 1832 (пл)

Додаток В

Термодинамічні властивості простих речовин
у стандартному стані

Речовина	Стан	S_{298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/(моль·К)			Температурний інтервал, К
			a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
1	2	3	4	5	6	7
Ag	к	42,58	21,31	8,54	1,51	298 – 1234
Al	к	28,36	20,68	12,39	–	298 – 932
As	к, сирый (α)	35,63	21,90	9,29	–	298 – 1100
Au	к	47,44	23,70	5,116	0,142	298 – 1336
B	к	5,86	19,824	5,78	–9,215	298 – 1700
Ba	к (α)	62,8	22,743	13,193	–0,285	298 – 643
Bi	к	56,9	22,948	10,13	–	298 – 545
C	к (графіт)	5,744	17,17	4,27	–8,79	298 – 2300
Ca	к (α)	41,45	22,23	13,94	–	273 – 713
Co	к (α)	30,06	19,85	16,75	–	298 – 700
Cr	к	23,66	19,804	12,85	–0,260	298 – 2176
Cu	к	33,17	22,65	6,28	–	298 – 1357
F ₂	г	202,85	34,71	1,84	–3,35	298 – 2000
Fe	к (α)	27,17	17,50	24,79	–	273 – 1033
Ge	к	31,15	25,04	3,43	–2,34	298 – 1213
H ₂	г	130,66	27,30	3,27	0,50	298 – 3000
I ₂	к	116,23	40,15	49,82	–	298 – 386,75
K	к	64,73	25,29	13,06	–	298 – 336,5
Mg	к	32,70	22,32	10,26	–0,431	298 – 923
Mn	к (α)	32,03	21,60	15,95	–	298 – 1000

Речовина	Стан	S_{298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/(моль·К)			Температурний інтервал, К
			a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
1	2	3	4	5	6	7
N ₂	г	191,63	27,88	4,27	–	298 – 2500
Na	к	51,33	20,93	22,44	–	298 – 371
Ni	к	29,89	32,66	– 1,80	– 5,589	298 – (630)
O ₂	г	205,17	29,98	4,2	– 1,7	298 – 3000
P	к (белый)	41,11	19,13	15,83	–	298 – 317
Pb	к	64,85	23,57	9,76	–	273 – 600
Pd	к	35,68	24,28	5,78	–	298 – 1828
Pt	к	41,57	24,267	5,380	–	298 – 2042
S	к	31,94	14,99	26,13	–	298 – 386,6
Sb	к	45,72	23,07	7,29	–	298 – 903
Si	к	18,84	23,95	2,47	– 4,14	298 – 1685
Sn	к (белое)	51,58	18,51	26,38	–	298 – 505
Ti	к (α)	30,65	22,11	10,0	–	298 – 1155
U	к (α)	50,33	10,93	37,47	4,90	298 – 941
V	к	28,93	20,52	10,80	0,8	298 – 2190
Zn	к	41,66	22,40	10,05	–	298 – 693

Додаток Г

Термодинамічні властивості хімічних сполук

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
Ag ₂ O	к	31,150	121,04	65,90	59,37	40,82	- 4,2	198–500
Ag ₂ CO ₃	к	506,452	167,5+4,2	112,54	79,42	108,23	–	298–450
AlF ₃	к	1511,4	66,53	75,15	72,31	45,89	- 9,63	298–727
AlN	к	318,6	20,18	30,14	22,90	32,66	–	298–900
Al ₂ O ₃	к (α, корунд)	1676,8	50,95	79,09	114,84	12,81	- 35,46	298–1800
	к (γ)	1662,0	52,544	83,037	106,68	17,79	- 28,55	298–1800
Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	к (кианит)	2596,2	83,82	121,84±2,1	171,87	29,22	- 52,17	298–1500
	к (андалузит)	2594,1	93,28	122,84	172,58	26,13	- 51,16	298–1600
	к (силлиманит)	2590,8	96,17	122,7	164,54	33,67	- 46,14	298–1500
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	к (муллит)	6824,5	254,47	326,47	485,2	47,0	- 155	298–2000
BN	к (α)	252,80	14,82+0,17	19,72+0,21	7,62	15,16	–	298–1200
B ₂ O ₃	к	1273,75	54,01	62,80	57,07	73,06	- 14,07	293–723
	аморф.	1254,83	80,8+1,3	62,8+0,8	–	–	–	–
B ₄ C	к	38,920	27,143	52,84	96,619	21,94	- 45,01	298–1800
BaCO ₃	к (α)	1217,1	112,2	85,41	86,96	48,99	- 11,97	298–1079
BaF ₂	к	1207,9	96,42	71,26	75	10,5	–	298–1563
BaO	к	553,9	70,46	47,81	49,36	7,87	- 3,68	298–2000
BaO ₂	к	634,7	(77,5)	–	56,9	8,37	–	–
BaS	к	460,5	78,3	49,40	–	–	–	–
C	к (алмаз)	- 1,830±0,08	2,370±0,021	6,121±0,04	9,13	13,23	- 6,20	298–1200
	аморф.	16,54	2,3714	6,121	–	–	–	–
CO	Г	110,599	197,676	29,132	28,43	4,10	- 0,46	298–2500

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
CO ₂		393,777	213,82	37,14	44,17	9,04	- 8,54	298–2500
CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	к (α, анортит)	4225,3	202,6	211,27	269,71	57,36	- 70,71	298–1700
	к (β, анортит)	4204,8	191,8	208,34	–	–	–	–
CaC ₂	к (α)	59,9	70,00	62,76	68,66	11,89	- 8,67	298–720
CaCO ₃	к (арагонит)	1207,92	88,8	81,31	83,28	42,87	- 13,98	298–600
	к (кальцит)	1207,72	92,9	81,94	104,59	21,94	- 25,96	298–1200
CaF ₂	к (α)	1220,5	68,91	67,07	–	–	–	–
	к (α)	1226,732	68,617	68,634	59,87	30,48	1,97	298–1424
CaMg(CO ₃) ₂	к (доломит)	2316,1	155,29	157,63	156,29	80,55	- 21,60	–
CaO	к	635,51	39,77	42,83	49,65	4,52	- 6,52	298–2888
CaO·2Al ₂ O ₃	к	3980,4	177,9	200,97	258,41	40,11	- 64,06	298–2023
Ca(OH) ₂	к	986,75	83,44	87,55	105,37	11,953	- 18,979	298–1000
CaS	к	482,7	56,5	47,44	42,70	15,91	–	298–1000
3CaO·Al ₂ O ₃	к	3590,2	200,0	210,01	251,04	31,36	- 49,40	298–1808
3CaO·P ₂ O ₅	к (α)	4123,6	236,1	227,97	–	–	–	–
	к (β)	4112,7	241,08	231,74	–	–	–	–
3CaO·2SiO ₂	к (ранкинит)	3963,6	210,93	214,53	267,96	37,89	- 68,5	–
12CaO·7Al ₂ O ₃	к (α, матенит)	19443	1047,5	1086,5	1264,2	274,24	- 231,53	298–1800
CaO	к	239,1	52,8	55,3	48,32	8,54	1,7	298–1800
Co ₃ O ₄	к	888±8	103,0	122,88	129,12	71,51	- 23,95	298–1000
CrO ₃	к	590,8	73,3	(74,5)	55,7	39,4	–	298–470
Cr ₂ O ₃	к	1141,3	81,2±1,3	118,9±1,3	113,04	9,21	- 15,66	298–1800
CuCO ₃	к	595,4	88	–	–	–	–	–
CuO	макроталли	162,11	42,66	42,33	48,27	7,87	- 7,87	298–1400
CuS	к	53,17	66,6±1,3	47,86	44,38	11,05	–	273–1273
Cu ₂ O	к	173,29	92,99	63,68	56,61	29,3	–	298–1509

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
Cu ₂ S	к (α)	79,5±2,1	121,0±2,1	76,37	–	–	–	–
FeCO ₃	к	738,644	95,5	83,3	48,962	112,17	–	298–800
FeCl ₃	Г	253,301	344,335	77,757	–	–	–	–
Fe _{0,947} O	к	265,4	57,61	48,15	48,82	8,37	– 2,80	298–1650
FeO	к	265,0±4,2	60,79	49,95	51,83	6,78	– 1,59	298–1200
Fe(OH) ₂	к	562,057	88±8	97,1±4,2	–	–	–	–
Fe(OH) ₃	к	827,182	105±8	101,7±4,2	–	–	–	–
	к	833,173	104,670	101,739	–	–	–	–
FeS	к (α, троилит)	100,5±1,3	60,33	50,58	21,73	110,53	–	298–441
FeS ₂	к (пирит)	163,3±5,4	52,96	62,22	74,86	5,53	– 12,77	298–1000
FeO·SiO ₂	к	1195,8	93,989	–	158,43	17,00	– 27,2	–
Fe ₂ O ₃	к (α)	822,7	87,5±2,1	103,8	98,35	77,87	– 14,86	298–953
Fe ₂ P	к	161,6±8,4	–	–	–	–	–	–
Fe ₃ O ₄	к	1117,9	146,29	150,894	91,61	201,8	–	298–900
					200,97	–	–	866–1870
GeCl ₄	Г	504,9	347,9	96,3±0,8	106,60	1,34	– 9,67	298–1000
GeO	к	237,4	(50,2)	–	–	–	–	–
	аморф.	255±21	–	–	–	–	–	–
	Г	30,702	223,95	30,81	34,25	1,93	– 3,56	298–2000
GeO ₂	к	555,09	55,31	52,13	62,80	11,97	– 12,64	298–1350
	аморф., стекл.	539,39	–	–	65,65	9,96	– 14,23	298–1800
GeS	Г	– 99,424	235,67	33,75	36,76	0,4	– 2,85	298–2000
H ₂ O	ж	286,021	70,00	75,350	52,96	47,65	7,24	273–373
	Г	241,980	188,850	33,599	30,02	10,72	0,33	298–2500
HgO	к (красная)	90,937	70,34	44,09	34,88	30,86	–	298–769
Hg ₂ O	к	91,3	(130,2)	–	–	–	–	–

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
I ₂	ж	- 22,6	137,3	-	80,39	-	-	386,75–458,65
KF	к (α)	566,39	66,641	49,350	46,013	14,432	-	298–1130
K ₂ CO ₃	к	1150,951	155,623	114,513	80,34	109,11	-	630–1171
K ₂ O	к	363,414	94,203	83,736	72,22	41,99	-	298–1154
K ₂ O ₂	к	496,136	113,044	100,23	80,072	68,584	-	298–763
K ₂ S	к	428,7	119,7	-	-	-	-	-
K ₂ O·SiO ₂	к	1559,6	138,2	-	136,586	24,480	- 21,583	298–1249
K ₃ PO ₄	к	(1946,74)	(211,68)	(152,36)	129,29	119,10	-	298–538
MgO·Al ₂ O ₃	к (шпинель)	2314,9	80,68	116,27	-	-	-	-
MgCO ₃	к	1112,433	65,900	76,263	77,96	57,78	- 17,42	298–750
	к	1096,5	65,7	75,57	-	-	-	-
MgF ₂	к	1124,2	57,28	61,63	70,88	10,59	- 9,21	298–1536
MgO	к	602,10	26,96	37,18	42,62	7,28	- 6,20	298–2100
MgO·SiO ₂	к	1550,04	67,78	81,43	102,79	20,24	- 26,08	298–1600
2MgO·SiO ₂	к	2175,5	95,21	118,57	149,93	27,38	- 35,67	298–1800
MnCO ₃	к	882,247	109,61	94,87	92,07	38,94	- 19,64	298–700
MnO	к	385,35	61,55±2,09	44,13	46,51	8,12	- 3,68	298–1800
MnO ₂	к	521,84	53,17	54,05	69,50	10,22	- 16,24	298–780
Mn ₂ O ₃	к	958,4	110,5±2,1	107,6	103,54	35,08	- 13,52	298–1350
Mn ₃ O ₄	к (α)	1388,55	154,9±8,4	139,4	145,03	45,30	- 9,21	298–1445
NaBO ₃	к	343,02	130,6	-	-	-	-	-
NaF	к	574,01	51,330	46,875	43,54	16,24	- 1,38	298–1270
NaHCO ₃	к	948,3	102,2	87,67	42,66	150,98	-	298–400
NaNO ₃	к (α)	467,00	116,60	93,11	25,707	226,04	-	298–579
Na ₂ CO ₃	к (α)	1131,525	138,889	111,076	11,024	244,199	24,509	298–723
	к (β)	-	-	-	50,116	129,163	-	723–1123

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
Na ₂ O	к	418,261	75,090	69,149	65,73	22,61	–	298–1100
Na ₂ S	к	372,625	97,971	79,507	82,94	6,87	–	298–1000
Na ₂ O·SiO ₂	к	1562,472	113,923	111,955	130,38	40,19	– 27,08	298–1361
Na ₂ O·2SiO ₂	к	2471,719	164,164	157,089	185,81	70,59	– 44,67	298–980
Na ₃ AlF ₆	к (α)	3311,759	238,606	215,867	192,38	123,34	– 11,64	298–845
Na ₃ PO ₄	к	1924,7	173,92	153,57	136,1	67,0	–	298–1613
NiCO ₃	к	695	86,2	86,2	–	–	–	–
NiO	к (α)	239,90	38,02	44,34	– 20,89	157,34	16,29	298–525
PbCO ₃	к	700,0	131,0±3,3	87,5	51,87	119,74	–	298–800
PbCl ₂	к	360,06	134,367±2,05	77,0±2,1	–	–	–	–
PbO	к (красный)	219,434	66,2±1,3	45,85	44,38	16,75	–	298–900
	к (желтый)	217,760	68,75	45,80	37,89	26,79	–	298–1000
PbO ₂	к	276,75	71,97	64,81	53,2	32,66	–	298–1000
Pb ₃ O ₄	к	723,90	211,4±6,7	14,70±1,3	130,2	73,7	–	–
PdO	к	115,6±3,3	38,9±4,2	31,4	13,82	59,4	–	298–823
S ₂	Г	– 127,601	228,18	32,49	35,75	1,17	– 3,31	298–2000
S ₃	Г	– 133,1±8,4	–	–	53,817	4,35	– 6,506	–
SO ₂	Г	297,10	248,24	39,90	178,11	10,63	– 5,94	298–1800
H ₂ S	Г	20,9±0,8	193,26	34,25	29,39	15,40	–	298–1800
Sb ₂ O ₄	к	908,1	127,3±8,4	114,68	94,6	67,8	–	298–1200
Sb ₂ O ₅	к	1008,2	125,2±8,4	117,69±1,3	45,84	241,03	–	298–500
Sb ₂ O ₃	к (черная)	157,8	181,7±4,2	123,30	79,97	71,6	–	273–929
SeO	Г	– 54,625	234,46	31,15	34,96	1,51	– 3,68	298–2000
SeO ₂	к	225,7	66,74±1,7	58,36	53,6	25,5	– 0,8	–
	Г	126,9±4,6	265,0	42,7±0,4	60,7	–	–	–
H ₂ Se	Г	– 33	218,97	34,67	31,78	14,6	– 1,30	298–2000

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
SiC	к	62,8±4,2	16,50	26,7	41,57	8,04	-15,32	298–1800
SiC	Г	-729±21	217,7±4,2	44,4±2,1	-	-	-	-
SiCl ₂	Г	160,4±6,3	278,8	49,8±0,8	-	-	-	-
SiCl ₄	ж	688,3	239,9	145,37	(140,3)	-	-	298–330
	Г	657,96	331,2	90,4	101,53	6,87	-11,51	298–1000
SiF ₄	Г	1616,02	282,2	73,7±0,8	91,52	13,27	-19,68	298–1000
SiO ₂	к (α-кварц)	911,55	41,87±0,42	44,46	46,98	34,33	-11,30	298–848
	к (α-тридимит)	906,0	43,5±0,8	44,63	13,69	103,83	-	298–390
	к (α-кристобалит)	908,87	42,7±0,4	44,21	17,92	88,17	-	298–523
	аморф., стекл.	902,17	-	-	56,02	15,41	-14,44	298–2000
	аморф. мелко-дисперсн.	897,44	-	-	-	-	-	-
SnCO ₃	к	699	-	-	-	-	-	-
SnO	к	286,17	56,5±2,1	44,4±2,5	39,98	14,65	-	298–1273
	Г	-20,867	232,162	31,778	35,35	1,34	-3,52	298–2000
SnO ₂	к	581,17	52,3±1,3	52,8±2,9	73,94	10,05	-21,60	298–1500
TiC	к	209±21	24,74	34,29	49,53	3,35	-14,99	298–1800
TiCl ₂	к	516,7	875±4,2	69,88	68,41	13,73	-	298–1273
	Г	238,6±12,6	278,4±12,6	57,4	-	-	-	-
TiCl ₃	к	721,0	139,8	97,13	96,17	10,80	-1,93	298–1000
TiCl ₃	Г	541,8±5,4	316,9±4,2	72,4	80,0	0,75	-7,1	-
TiCl ₄	ж	804,70	252,59	145,28	145,28	-	-	285–410
	Г	763,7	353,4±3,8	95,5±2,9	106,55	1,00	-9,88	298–2000
TiN	к	323,2	30,35	37,10	49,86	3,93	-12,39	298–1800
TiO	к (α)	526,3	34,79	39,98	44,25	15,07	-7,79	298–1264
TiO ₂	к (рутил)	944,50	50,37	55,06	75,24	1,17	-18,21	298–1800

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
TiS ₂	к (α)	269,2	56,5±8,4	–	33,83	114,47	–	298–420
	к (β)	425,4	78,42	67,95	62,76	21,52	–	420–1010
TiO ₃	к (α)	1519,0	77,37	95,92	30,60	224,08	–	298–473
	к (β)	–	–	–	145,20	5,44	– 42,70	473–1800
Ti ₃ O ₅	к (α)	–	–	–	148,51	123,51	–	298–450
	к (β)	2457,7	127,15	151,48	174,17	33,5	–	450–1600
UF ₄	к	1898,7	152,0	116,0	107,6	29,31	– 0,25	298–1309
UF ₆	к	2188,19	227,8	166,84	52,7	385,2	–	273–337
	Г	2138,49	376,820	129,682	151,14	5,44	– 20,39	298–1000
UO ₂	к	1086,5	78,00	64,18	80,39	6,78	– 16,58	298–1500
UO ₃	к (α)	1220,24	–	–	–	–	–	–
	к (β)	1222,5	–	–	–	–	–	–
	к (γ)	1231	98,68	84,41	92,49	10,63	– 12,43	298–900
UO ₃	аморф.	1223,63	–	–	–	–	–	–
U ₃ O ₇	к (α)	3429	247,82	213,90	–	–	–	–
	к (β)	3429	250,71	215,66	–	–	–	–
U ₃ O ₈	к	3577,2	282,751	238,10	282,6	36,97	– 49,99	298–900
U ₄ O ₉	к	4522	336,16	293,54	356,51	35,46	– 66,44	298–900
VCl ₂	к	461,8±8,4	97,1±1,3	72,26	72,22	11,39	– 2,97	298–1300
VCl ₃	к	581,5	131,0±1,7	93,24	96,25	16,41	– 7,03	298–900
VCl ₄	Ж	570,2	259,6±8,4	–	161,82	–	–	247–425
	Г	526,3	368,63	96,3	96,46	8,88	– 5,69	–
VN	к	218,1±5,0	37,30	38,02	45,80	8,79	– 9,25	298–1600
VO	к	432,1±4,6	33,62±0,42	38,60±0,42	47,39	13,48	– 5,27	298–1700
V ₂ O ₃	к	1219,87	98,4±1,3	103,29	122,88	19,93	– 22,69	298–1800
V ₂ O ₄	к (α)	1427,7	96,7±1,3	114,7	125,23	–	–	293–345

Речовина	Стан	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)	C_{p298}° , Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + dT^2$, Дж/моль			Температурний інтервал, К
					a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$	
V ₂ O ₅	к	1553,3	131,0±1,3	127,74	194,85	- 16,33	- 55,35	298–943
ZnCO ₃	к	818,595	82,5±0,8	80,14	38,9	138,2	-	298–500
ZnO	к	350,862	43,67	40,28	49,03	5,11	- 9,13	298–1600
ZnS	к (сфалерит)	205,6±2,5	57,78	45,55	50,91	5,19	- 5,69	298–1200
	к (вюрцит)	192,2±3,3	58,883	45,908	-	-	-	-

Додаток Д

Ентальпії і температури поліморфних перетворювань
($\Delta H_{пер.}$), плавлення ($\Delta H_{пл.}$) і випарування ($\Delta H_{вип.}$) деяких металів та їхніх сполук

Речовина	Вид перетворю- вань	Температура пере- творювання, К	Ентальпія пе- ретворювань, Дж/моль (грам-атом)	Речовина	Вид перетворю- вань	Температура пере- творювання, К	Ентальпія пе- ретворювань, Дж/моль (грам-атом)
Al _Т	п	932	10670	Nb _Т	к	5273	697100
Al _ж	к	2773	324500	Ti _α	т	1155	3350
B _Т	п	2300	22175	Ti _Т	п	1940	15500
B _ж	к	4200	539300	Ti _ж	к	3533	429150
V _Т	п	2185	17570	Cr _Т	п	2130	20930
V _ж	к	3823	458900	Cr _ж	к	2773	386000
W _Т	п	3650	35230	Ce _α	т	998	2930
W _ж	к	5800	766000	Ce _Т	п	1077	9200
Fe _α	т	1033	5108	Ce _ж	к	3200	314000
Fe _β	т	1187	670	Zn _Т	п	693	7390
Fe _γ	т	1664	837	Zn _ж	к	1181	115388
Fe _δ	п	1812	15190	Zr _α	т	1143	4350
Fe _ж	к	3343	375000	Zr _Т	п	2123	16750
Ca _Т	п	1123	8660	Zr _ж	к	4700	582000
Ca _ж	к	1765	149950	Al ₂ O _{3Т}	п	2303	108860
Co _Т	п	1765	15230	B ₂ O _{3Т}	п	723	23030
Co _ж	к	3173	382700	V ₂ O _{5Т}	п	943	65300
Si _Т	п	1686	50670	WO _{3Т}	п	1746	58400
Si _ж	к	2873	303543	FeO _Т	п	1651	30980
Mg _Т	п	923	8950	CaO _Т	п	2873	79550
Mg _ж	к	1390	128660	SiO _{2Т} (кварц)	п	1883	8540
Mn _α	т	993	2220	SiO _{2Т} (кри- стобалит)	п	1986	12980
Mn _β	т	1363	2220	SiO _{2Т} (три- димит)	п	1953	9000
Mn _γ	т	1409	1800				
Mn _Т	п	1516	14640	MgO _Т	п	3073	77460
Mn _ж	к	2368	224831	MnO _Т	п	2058	54430
Cu _Т	п	1356	13050	Cu ₂ O _Т	п	1503	56100
Cu _ж	к	2843	332400	MoO _{3Т}	п	1068	49860
Mo _Т	п	2880	27610	MoO _{3ж}	к	1553	178870
Ni _Т	п	1726	17610	Nb ₂ O _{5Т}	т	1763	125600
Ni _ж	к	3183	374300	TiO _{2Т}	п	2143	64900
Nb _Т	п	2741	26360				

Рекомендована література

1. Ванюков А.В., Зайцев В.А. Теория пирометаллургических процессов. – М.: Metallurgy, 1973. – 504 с.
2. Вольский А.Н., Сергиевская Е.М. Теория металлургических процессов. – М.: Metallurgy, 1968. – 344 с.
3. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Metallurgy, 1988. – 288 с.
4. Куликов И.С. Термодинамика оксидов: Справ. изд. – М.: Metallurgy, 1986. – 344 с.
5. Элиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. – М.: Metallurgy, 1969. – 252 с.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи з дисципліни
„Теорія пірометалургійних процесів”
(для студентів спеціальності
7.0904.02 „Металургія кольорових металів”)

Укладачі: Микола Олександрович Маняк
Ігор Олексійович Орлов
Марія Вікторівна Гольцова

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до курсової роботи з дисципліни
„Теорія пірометалургійних процесів”**

Рецензія

на Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни „Теорія пірометалургійних процесів” (для студентів спеціальності 7.0904.02 „Металургія кольорових металів”)

(Укладачі: М.О. Маняк, І.О. Орлов, М.В. Гольцова)

В роботі, що рецензується, наведено основні відомості з теорії пірометалургійних процесів, які стосуються розрахунків процесів дисоціації і утворення сполук і процесів відновлення оксидів металів.

В додатках наведено довідковий матеріал, який використовується при розрахунках процесів пірометалургії, що значно полегшить роботу студентів при виконанні курсової роботи.

В цілому, „Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни „Теорія пірометалургійних процесів” (для студентів спеціальності 7.0904.02 „Металургія кольорових металів”)” написано доступною мовою, вони містять приклади розрахунків, а також перелік рекомендованої літератури.

Вважаю, що „Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни „Теорія пірометалургійних процесів” (для студентів спеціальності 7.0904.02 „Металургія кольорових металів”)” слід якнайскоріше оприлюднити, бо цю дисципліну студенти почнуть вивчати з весіннього семестру 2006–07 навчального року.

Заст. завідувача кафедри
„Електрометалургія”
проф., д.т.н.

А.Д. Рябцев