

PACS: 61.72.Ff, 64.70.D, 64.70.dm, 65.40.gd

**THE THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF MONOBORIDES XB (X=Ti, Mn, Fe, Co)****N. Yu. Filonenko***Dnipropetrovsk Medical Academy, Ministry of Public Health of Ukraine  
49044, Ukraine, Dnipro, Vladimir Vernadsky, 9**E-mail: [natph@mail.ru](mailto:natph@mail.ru)*

Received December 1, 2016

In the paper the physical properties and thermodynamic functions of monoborides XB (X=Ti, Mn, Fe, Co) are studied with accounting for fluctuation processes. The research was performed for alloys with boron content of 9,0-15,0 % (wt.), the rest is metal X (X=Ti, Mn, Fe, Co). We use the microstructure analysis, the X-ray structural and the durometric analyses to determine the physical properties of alloys. In the paper it is determined the phase composition of Ti-B, Mn-B, Fe-B and Co-B alloys and physical properties of monoborides. In this paper for the first time it is determined the thermodynamic functions of monoborides using the Hillert and Staffansson model with accounting for the first degree approximation of high-temperature expansion for the free energy potential of binary alloys. We obtain the temperature dependences for such thermodynamic functions as Gibbs free energy, entropy, enthalpy and heat capacity  $C_p$  along with their values at the formation temperature for XB monoborides (X=Ti, Mn, Fe, Co). The approach under consideration enables to give more thorough from the thermodynamic point of view description of monoborides formed from the liquid. The outcomes of the thermodynamic function calculation for TiB, MnB, CoB та FeB monoborides are in good agreement with experimental data and results of other authors.

**KEY WORDS:** monoborides, Gibbs energy, entropy, enthalpy, heat capacity, fluctuation process**ТЕРМОДИНАМІЧНІ ФУНКЦІЇ МОНОБОРИДІВ XB (XB (X=Ti, Mn, Fe, Co)****Н.Ю. Філоненко***Державний заклад «Дніпропетровська медична академія МОЗ України»  
м. Дніпро, вул. Володимира Вернадського, 9, 49044, Україна*

У роботі досліджено фізичні властивості та термодинамічні функції моноборидів XB (X=Ti, Mn, Fe, Co) з урахуванням флуктуаційних процесів. Дослідження проводили на сплавах з вмістом бору 9,0-15,0 % (мас.), інше – метал X (X=Ti, Mn, Fe, Co). Для визначення фізичних властивостей сплавів використовували мікроструктурний, рентгеноструктурний та дюрOMETричний аналізи. В роботі було визначено фазовий склад сплавів Ti-B, Mn-B, Fe-B та Co-B і фізичні властивості моноборидів. Вперше визначено термодинамічні функції моноборидів з використанням моделі Хіллєрта і Стеффансона та з урахуванням першого ступеня наближення високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу бінарних сплавів. Для моноборидів XB (X=Ti, Mn, Fe, Co) отримано залежності від температури таких термодинамічних функцій, як енергія Гіббса, ентропія, ентальпія й теплоємність  $C_p$ , а також визначено їх значення при температурі утворення. Використаний у даній роботі підхід дає можливість надати найбільш повний з термодинамічної точки зору опис моноборидів, що утворюються з рідини. Отримані результати розрахунків термодинамічних функцій моноборидів TiB, MnB, CoB та FeB добре узгоджуються з експериментальними даними та даними інших авторів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** монобориди, енергія Гіббса, ентропія, ентальпія, теплоємність, флуктуаційний процес**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ МОНОБОРИДОВ XB (X=Ti, Mn, Fe, Co)****Н.Ю. Филоненко***ГУ «Днепропетровская государственная медицинская академия МОЗ Украины»  
49044, Украина, г. Днепро, ул. Владимира Вернадского, 9*

В работе исследованы физические свойства и термодинамические функции моноборидов XB (X=Ti, Mn, Fe, Co) с учетом флуктуационных процессов. Исследования проводились на сплавах с содержанием бора 9,0-15,0 % (масс.), остальное – металл X (X=Ti, Mn, Fe, Co). Для определения физических свойств сплавов использовались микроструктурный, рентгеноструктурный и дюрOMETрический анализы. В работе были определены фазовый состав сплавов Ti-B, Mn-B, Fe-B и Co-B и физические свойства моноборидов. Экспериментальное определение термодинамических характеристик моноборидов является достаточно сложным. Поэтому в данной работе впервые определены термодинамические функции моноборидов при использовании модели Хиллєрта и Стеффансона и с учетом первой степени приближения високотемпературного разложения термодинамического потенциала бинарных сплавов. Для моноборидов XB (X=Ti, Mn, Fe, Co) получены зависимости от температуры таких термодинамических функций, как энергия Гиббса, энтропия, энтальпия и теплоемность  $C_p$ , а также определены их значения при температуре образования. Использованный в данной работе подход позволяет предоставить наиболее полное с термодинамической точки зрения описание моноборидов, образующихся из жидкости. Полученные результаты расчетов термодинамических функций моноборидов TiB, MnB, CoB и FeB хорошо согласуются с экспериментальными данными и данными других авторов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** монобориды, энергия Гиббса, энтропия, энтальпия, теплоёмкость, флуктуационный процесс

Сплави, що містять бор мають практичне застосування, через комплекс унікальних властивостей, таких як тугоплавкість, висока твердість, хімічна стійкість в різних агресивних середовищах та інші [1-2]. Так, наприклад, бориди та сплави, що містять бор, застосовують в атомній енергетиці завдяки їх спеціальним властивостям [3], а також, при створенні нових композиційних матеріалів, де в якості зміцнюючі фаз використовують монобориди [1-2].

Дослідження фізичних властивостей та термодинамічних функцій сплавів, що містять бор має теоретичне та практичне значення, тому, що монобориди утворюються не тільки в сплавах на основі металів з вмістом бору 9,0-16,0 % (мас.), а також в результаті процесу насичення поверхні сплавів бором і впливають на фізичні властивості борованого шару. Крім того, це дозволить розробити металеві сплави, що містять бориди, композиційні матеріали та покриття з прогнозованими фізичними властивостями та фазовим складом.

Як відомо, у сплавах, що містять 50 % (ат.) бору відбувається утворення монобориду з рідини [1-2]. Монобориди TiB, MnB, CoB та FeB мають ромбічну елементарну комірку з 4 атомами в елементарній комірці та відносяться до просторової групи [4].

В роботах [5-10] автори наводять результати розрахунку енергії Гіббса фаз TiB, MnB, CoB та FeB з застосуванням моделей, які можуть бути використані тільки за рівноважних умов та не враховують флуктуаційні процеси.

Метою даної роботи було дослідження фізичних властивостей та термодинамічних функцій моноборидів, їх залежності від температури з урахуванням першого ступеня наближення високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу бінарних сплавів, що дозволить визначити значення термодинамічних функцій моноборидів, у високотемпературній області та врахувати внесок флуктуаційних процесів.

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили на зразках із вмістом бору 9,0-15,0 % (мас.) – метал (титан, марганець, кобальт та залізо), для отримання яких використовували шихту такого складу: метал з вмістом 99,99 %, аморфний бор (з вмістом бору 97,5 % (мас.)). Виплавку зразків проводили в печі Тамана з графітовим нагрівачем в алундових тиглях в атмосфері аргону. Швидкість охолодження сплавів складала 10 К/с. Для визначення хімічного складу сплаву використовували хімічний та спектральний аналіз [11]. Мікротвердість фаз вимірювали на приборі ПМТ-3.

Фазовий склад сплавів визначали методом мікрорентгеноспектрального аналізу на мікроскопі JSM-6490, а також за допомогою оптичного мікроскопу «Неофот-21». Локальний рентгеноспектральний аналіз проведено з використанням внутрішніх еталонів. Рентгеноструктурний аналіз здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3 в монохроматизованому Fe-K $\alpha$  випромінюванні.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Мікроструктура сплавів Mn-B, Fe-B та Co-B в литому стані, з вмістом бору в інтервалі 9,0-15,0 % (мас.), містить округлі дендрити моноборидів, розташованих у твердому розчині на основі бориду металу (рис. 1).

Відомо, що бор має малу розчинність в титані, тому при легуванні бором титану в кількості, навіть більшій ніж 0,2 % (мас.), по границях  $\beta$ -зерен спостерігали утворення монобориду TiB, який мав морфологію первинних волокон (рис. 1а).

Результати визначення параметра ґратки фаз TiB, MnB, FeB та CoB рентгеноструктурним методом корелюють з даними, наведеними іншими авторами (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри кристалічної ґратки моноборидів

Моноборид	Вміст бору, % (мас.)	Параметри кристалічної ґратки (експ.)			Параметри кристалічної ґратки (табл.)			Джерело
		a, Å	b, Å	c, Å	a, Å	b, Å	c, Å	
TiB	0,3	4,563	3,065	6,115	4,56	3,06	6,112	[1]
MnB	12,0	4,145	2,979	5,5562	4,144	2,977	5,556	[12]
FeB	12,0	4,0569	3,027	5,0683	4,061	2,295	5,502	[4]
CoB	12,1	3,952	3,021	5,254	3,956	3,043	5,253	[13]

Для моноборидів TiB та MnB спостерігали незначне збільшення ступеня мікронапружень та густини дислокацій (табл. 2) у порівнянні з іншими моноборидами.

Таблиця 2

Розмір кристалітів, густина дислокацій, ступень мікронапружень у моноборидах

Моноборид	Вміст бору, % (мас.)	Розмір кристалітів L, Å	Ступень мікронапружень	Густина дислокацій $\rho \times 10^{10}$ , см <sup>-2</sup>
TiB	0,3	1022	$7,81 \cdot 10^{-3}$	8,64
MnB	12,0	984	$7,12 \cdot 10^{-3}$	6,79
FeB	12,0	920	$5,26 \cdot 10^{-4}$	5,1
CoB	12,1	856	$2,85 \cdot 10^{-3}$	4,92

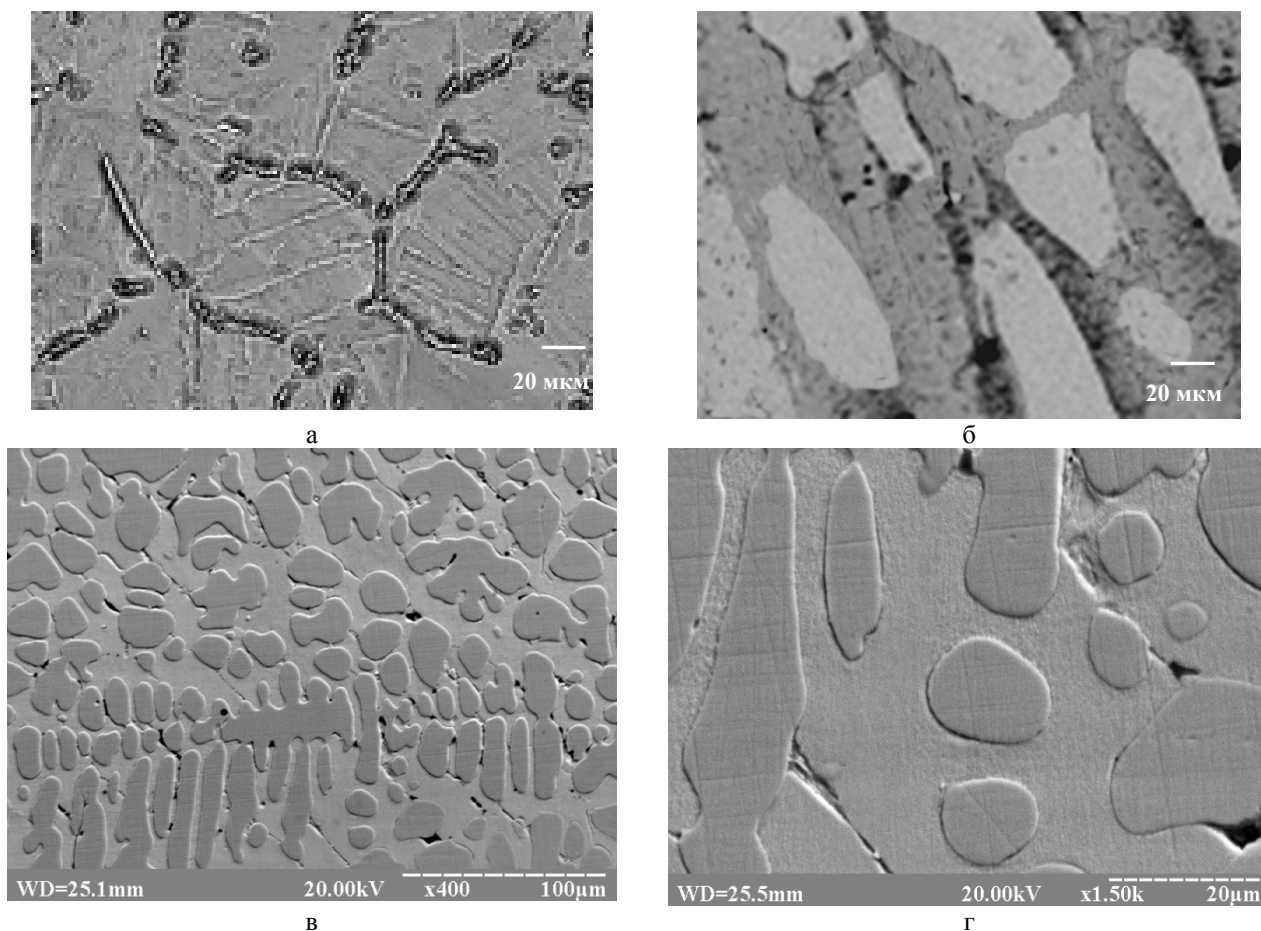


Рис. 1. Мікроструктура сплавів з вмістом бору 13 % (мас.) Ti-B (а), Mn-B (б), Fe-B (в) та Co-B (г)

Крім того, відомо, що на фазові перетворення у сплавах на основі металів, що містять бор мають вплив домішки карбону та інших елементів [14-15]. Результати спектрального аналізу сплавів Ti-B, Mn-B, Fe-B та Co-B показали, що у сплаві, крім металів та бору, присутні: домішки карбону з вмістом 0,05 % (мас.), кремнію – 0,004 % (мас.). Відомо, що розчинність карбону в боридях мала, але більша за значенням, ніж у сплавах, які досліджували в даній роботі [16]. Незважаючи на присутність карбону у сплавах, що досліджували можна стверджувати, що його вплив на фазові перетворення незначний.

Отримання на підставі експериментальних досліджень значень термодинамічних функцій моноборидів TiB, MnB, FeB та CoB містить певні труднощі. Тому врахування внеску першого ступеню наближення високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу у моделі Хіллера та Стеффансона дає змогу теоретично визначити термодинамічні функції моноборидів та їх залежність від температури.

**Енергія Гіббса моноборидів TiB, MnB, FeB та CoB.** Енергія Гіббса фази, як відомо, є функцією незалежних змінних  $G = G(p, T, y)$ , де  $p$  – тиск,  $T$  – температура,  $y$  – масовий вміст елементів. Для мольних часток компонентів в сполучі чи сплаві виконується умова  $\sum_{i=1}^2 y_i = 1$ .

За підгратковою моделлю Хіллера та Стеффансона [17] було розраховано енергію Гіббса моноборидів:

$$G_m^{MeB} = y_{Me} {}^0G_{Me} + y_B {}^0G_B + RT(y_{Me} \ln y_{Me} + y_B \ln y_B) + y_{Me} y_B L_{Me:B} \quad (1)$$

Використовуючи дані для енергії чистих компонент  ${}^0G_{Me}$ ,  ${}^0G_B$  [18-19], дані енергії взаємодії між компонентами в фазі  $L_{Me:B}$  з робіт [5, 7, 8, 20], отримано наступну залежність енергії Гіббса моноборидів від температури (табл. 3).

Моделю Хіллера та Стеффансона можна застосувати для рівноважного стану. У потенціалах моделі Хіллера та Стеффансона не враховано внесок першого ступеня наближення високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу бінарного сплаву, який необхідно враховувати при знаходженні енергії Гіббса фаз, що утворюються з рідини, та включенні до розгляду флуктуаційних процесів.

Таблиця 3

Залежність енергії Гіббса моноборидів від температури

Моноборид	$G_m^{MB}$ , (Дж/моль)	Джерело
TiB	$-83553 + 2,1 T$	У даній роботі
	$-83020 + 1,62 T$	[20]
	$-142942 + 28,03 T$	[21]
MnB	$-49296,3 + 1,8 T$	У даній роботі
	$-35800 - 9,9995 T$	[9]
	$-36225 + 0,439 T$	[12]
FeB	$-41500 + 9,8 T$	У даній роботі
	$-73410 + 6,5 T$	[22]
	$-34300 + 3,25 T$	[23]
CoB	$-35786,5 + 1,3 T$	У даній роботі
	$-34500,0 + 0,24 T$	[10]
	$-28564 + 5,07 T$	[24]

Як відомо з теорії бінарних сплавів, статистична сума такої системи не може бути обчислена точно, але згідно з методом Кірквуда може бути записана у вигляді нескінченного ряду за ступенями  $1/T$  [25-26]. Таким чином, енергію Гіббса з урахуванням першого ступеня наближення для моноборидів визначимо як:

$$G_m^{MeB} = y_{Me} {}^0G_{Me} + y_B {}^0G_B + RT(y_{Me} \ln y_{Me} + y_B \ln y_B) + y_{Me} y_B L_{MeB} - \frac{L_{MeB}^2 y_{Me}^2 y_B^2}{2ZRT} \quad (1)$$

де  $Z$  – координаційне число, яке для монобориду дорівнює  $Z = 4$ .

За результатами розрахунку за формулою (1) були отримані математичні залежності енергії Гіббса моноборидів TiB, MnB, CoB та FeB від температури та значення енергії Гіббса моноборидів при температурі утворення (табл. 4).

Таблиця 4

Залежності енергії Гіббса моноборидів від температури та її числові значення при температурі утворення

Моноборид	$G_m^{MeB}$ , Дж/моль	$G_m^{MeB}$ при температурі утворення, Дж/моль	$G_m^{MeB}$ , (Дж/моль)
TiB	$G_m^{TiB} = -89553,32 + 2,1 T - 9,8 \cdot 10^5 T^{-1}$	-82821,29	-81633,7 [21]
MnB	$G_m^{MnB} = -49296,3 + 1,8 T - 5,1 \cdot 10^6 T^{-1}$	-47731,88	-56029 [9]
FeB	$G_m^{FeB} = -41500 + 7,8 T - 7 \cdot 10^5 T^{-1}$	-27264,3	-28203 [23]
CoB	$G_m^{CoB} = -35786 + 1,3 T - 2,8 \cdot 10^6 T^{-1}$	-35171,2	-34086,5 [13]

Як видно з табл. 4, отримані значення енергії Гіббса моноборидів корелюють зі значеннями інших авторів.

Таким чином, отримана залежність енергії Гіббса моноборидів від температури дозволяє визначити їх значення в високотемпературній області та врахувати внесок флуктуаційних процесів.

**Ентропія, ентальпія та теплосмість Ср моноборидів TiB, MnB, FeB та CoB.** Однією з найважливіших термодинамічних характеристик фази є ентропія. Ентропію моноборидів можна визначити за формулою

$$S = - \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -R(y_{Me} \ln y_{Me} + y_B \ln y_B) - \frac{L_{MeB}^2}{2ZRT^2} y_{Me}^2 y_B^2$$

Врахування внеску першого ступеня наближення високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу в енергії Гіббса дозволило визначити ентальпію моноборидів. Для обчислення ентальпії моноборидів використаємо співвідношення [27]:  $\Delta H = \Delta G + T\Delta S$ .

Залежність ентальпії фаз TiB, MnB, CoB та FeB від температури має наступний вигляд:

$$H^{TiB} = -82369 + 0,7 T - 3,2 \cdot 10^5 T^{-1}, \quad H^{MnB} = -49253 + 0,5 T - 4,25 \cdot 10^5 T^{-1},$$

$$H^{FeB} = -38852 + 1,2 T - 3 \cdot 10^5 T^{-1}, \quad H^{CoB} = -36534 + 0,7 T - 4,2 \cdot 10^5 T^{-1}$$

Таким чином, результати розрахунку чисельних значень ентальпії при температурі утворення, отримані в даній роботі, узгоджуються з результатами інших авторів [9, 13, 21, 7,28, 29].

Для фаз TiB, MnB, CoB та FeB було визначено теплоємність з застосуванням співвідношення

$$C_p = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p = \frac{L_{Fe:B}^2}{RZT^2} y_{Fe}^2 y_B^2.$$

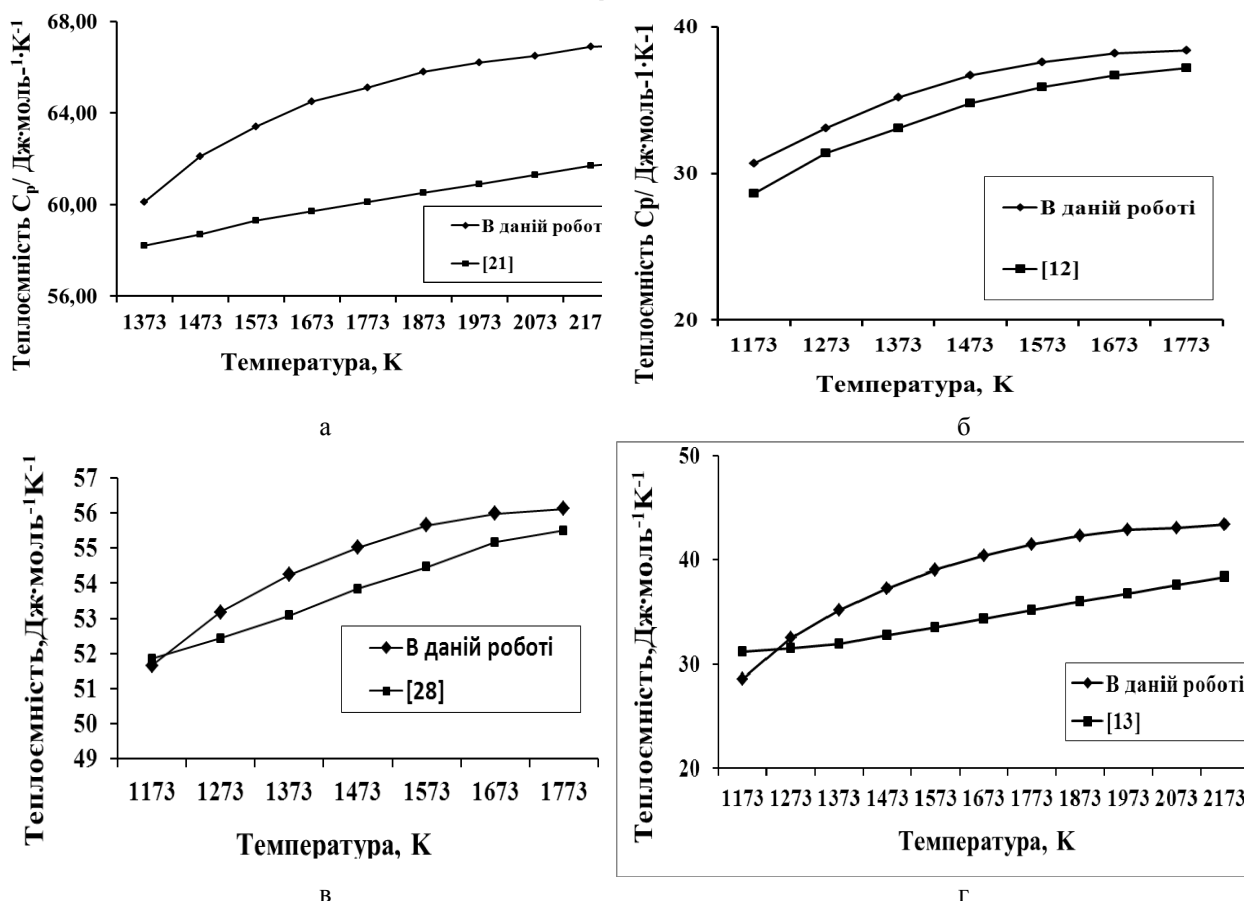


Рис. 2. Залежність теплоємності  $C_p$  моноборидів TiB (а), MnB (б), FeB (в) та CoB (г) від температури

Отримані результати – залежність теплоємності  $C_p$  моноборидів TiB, MnB, FeB та CoB від температури (рис. 2) – корелюють з результатами наведеними в роботах [8, 12, 21, 28, 30].

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про те, що врахування у моделі Хіллера й Стеффансона внеску першого ступеня наближення високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу бінарних сплавів дозволяє виконати розрахунки таких термодинамічних величин моноборидів, як ентропія, ентальпія, теплоємність та їх залежність від температури. Крім того, це дає змогу найбільш повно з термодинамічної точки зору надати опис моноборидів, що утворюються з рідини.

### ВИСНОВКИ

У роботі досліджено структурні та фізичні властивості моноборидів TiB, MnB, CoB та FeB в бінарних сплавах з масовим вмістом бору 9,0-15,0 % (мас.), інше – метал.

Слід зазначити, що термодинамічні функції фаз дають змогу прогнозувати фізичні та хімічні властивості сплавів за змінних зовнішніх умов, таких як температура, тиск тощо. Достатньо відомі методи розрахунку термодинамічних функцій фаз можуть бути використані тільки за рівноважних умов і не враховують флуктуаційні процеси. Тому в роботі за моделлю Хіллера й Стеффансона з урахуванням внеску першого ступеня наближення високотемпературного розвинення термодинамічного потенціалу моноборидів TiB, MnB, CoB та FeB були отримані залежності від температури таких термодинамічних функцій, як енергія Гіббса, ентропія, ентальпія і теплоємність  $C_p$ .

Отримані результати розрахунків термодинамічних функцій моноборидів TiB, MnB, CoB та FeB добре узгоджуються з експериментальними даними.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. Boridy [Borides]. – Moscow: Atomizdat, 1999. – 220 p. (In Russian)
2. Lyakishev N.P., Pliner Yu.L., Lappo S.I. Borsoderzhaschiye stali i splavy [Boron containing steels and alloys.]. – Moscow: Metallurgiya, 1986. – 191 p. (In Russian)
3. Smirnov A.V. Rust-resisting steel Boron 304 with boron, meant for divided cask making for storage and transportation of nuclear waste // Iron and steel industry news bulletin abroad. Alerting service. - 1981, issue 63-II. - P. 1-4.
4. Kuzma Yu.B. Kristalokhimiya boridov [Crystal chemistry of borides]. – Kyiv: Vyscha shkola, 1983. – 159 p. (In Russian)
5. Halemans B., Wollemans P., Roos J.R. Thermodynamic Reassessment and Calculation of the Fe-B Phase Diagram // Metallkd.– 1994. – 85(10). – P. 676-682.
6. Li Yan-feng, Xu Hui, Xia Qing-lin, LIU Xiao-liang J. First-principles calculation of structural and Thermodynamic properties of titanium boride // Cent. South Univ. Technol. – 2011. – Vol.18. – P. 1773–1779.
7. Bing Wang, Xiang Li, Yuan Xu Wang, Yu Fei Tu Phase Stability and Physical Properties of Manganese Borides: A First-Principles Study // J. Phys. Chem. C. – 2011. – Vol.115 (43). – P. 21429–21435.
8. Mikhajlovskij B.V., Goryacheva V.I., Kutsenok I.B. Calculation of self-consistent thermodynamic data and phase equilibria for the cobalt-boron system // Zhurnal Fizicheskoy Khimii. – 1999. – Vol. 73(4). – P. 763-765.
9. Weihua Sun, Yong Du, Shuhong Liu, Baiyun Huang, Chao Jiang Terodynamic Assessment of the Mn-B System // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2010. – Vol. 31. – No. 4. – P. 357–364.
10. Witusiewicz V.T. Thermodynamics of binary and ternary melts of the 3d transition metals (Cr, Mn, Fe, Co and Ni) with boron // Thermochemica Acta. – 1995. – Vol. 264. – P. 41-58.
11. Tverdokhlebova S.V. Spektrometriya borsoderzhaschikh splavov [Spectrometry of boron alloys] // Visnyk Dnipropetrovskogo universytety. Seria «Fizyka. Radioelektronika». – 2007. – Issue 14. – No. 12/1. – P. 100-104. (In Russian)
12. Liao P.K., Spear K.E. The B-Mn (Boron-Manganese) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1986. – Vol. 7. – No. 6. – P. 543-549.
13. Liao P.K., Spear K.E. The B-Co (Boron-Cobalt) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1988. – Vol. 9. – No.4. – P. 452-457.
14. Portnoy K.I., Levinskaya M. Kh., Romashov V.M. State diagram of iron-boron system // Metal powder industry. – 1969. – No.8(80). – P. 66-69.
15. Filonenko N.Yu., Beryozha O.Yu., Bezrukava O.G. The effect of carbon on phase composition and phase transformations in Fe-B system alloys // Promblems of atomic science and technology. – 2013. – No.5. – P. 168-172.
16. Filonenko N.Yu., Galdina O.M. Effect of carbon on physical and structural properties of FeB iron monoboride // East Eur. J. Phys. – 2016. – Vol.3. – No.2. – P. 49-53.
17. Hillert M., Staffonsson L. The Regular Model for Stoichiometric Phases and Ionic Melts // Acta Chemica Scand. – 1970. – Vol.24(10). – P. 3618-3626.
18. Richard A. Roble and David R. Waldbaum Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15°K (25.0°C) and One Atmosphere (1.013 Bars) Pressure and at Higher Temperatures. – Orton memorial library the OHIO State University 155 S. Oval Drive, 1970. – P. 262.
19. SGTE data for pure elements A T Dinsdale NPL Materials Centre, Division of Industry and Innovation, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 0LW, UK. – P. 174.
20. Nakama Yu., Ohtani Hiroshi, Hasebe Mitsuhiro Thermodynamic Analysis of the Nb–Ti–B Ternary Phase Diagram // Materials Transactions. – 2009. – Vol. 50. – No. 5. – P. 984-993.
21. Murray J.L., Liao P.K. The B-Ti (Boron-Titanium) System // Bulletin, of Alloy Phase Diagrams. –1986. – Vol. 7. – No. 6. – P. 550-555.
22. Keita Yoshimoti, Yu Nakama, Hiroshi Ohtani, Mitsuhiro Haseb Thermodynamic Analysis of the Fe–Nb–B Ternary System // ISIJ International. – 2008. – No.48(6). – P. 835-844.
23. Hiroshi Ohtani, Mitsuhiro Hasebe, Taiji Nishizawa Calculation of Fe-C-B // Ternary Phase Diagram. Transactions ISIJ. – 1988. – Vol. 28. – P. 1043-1050.
24. Liu Y.Q., Zhao X.S., Yang J., Shen J.Y. Thermodynamic optimization of the boron–cobalt–iron system // J. of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol.509. - P. 4805-4810.
25. Shakhparonov M.I. Introduction to the molecular theory of solutions. – Moscow: Gosud. izd-vo tekhniko-teorit. lit, 1956. – 507 p. (In Russian)
26. Ghirifalko L. Statistical physics of a solid body. – Moscow: Mir, 1975 – 386 p. (In Russian)
27. Bazarov I.P. Thermodynamics. – Moscow: Vysshaja shkola, 1991– 376 p. (In Russian)
28. Van T. Rompaey et al. Thermodynamic. Optimization of the B-Fe System // Journal of Alloys and Compounds – 2002. – No. 334. – P. 173–181.
29. Mihalkovic M., Widom M. Initio Calculations of Cohesive Energies of Fe-based Glass-forming Alloys // Physical Review. – 2004. – Vol. B70. – No. 14. – P. 144107–144112.
30. Voitovich R.F., Shakhanova N.P. Calculation of the capacities of refractory compounds // Translated from Poroshkovaya Metallurgiya.– 1967. – No. 3(51). – P. 75-79.