

УДК 536 + 539.2

Л.В. Базюк, Г.О. Сіренко

Термофізичні властивості металів та сплавів: 3. Залежність коефіцієнта теплоємності від температури та радіусу атомів

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна*

За літературними даними вивчено, проаналізовано методами кореляційної та регресійної аналізу та обґрунтовані залежності коефіцієнта теплоємності від температури, порядкового номера та радіусу атома металів. Показано, що з підвищенням температури для більшості металів та сплавів коефіцієнт теплоємності зростає. Встановлено, що між коефіцієнтом теплоємності і радіусом атомів металів існує нелінійний зв'язок, а між коефіцієнтом теплоємності та порядковим номером металів у Періодичній системі першнів існує статистично надійний лінійний зв'язок.

Ключові слова: метали, сплави, коефіцієнт теплоємності, термофізичні властивості, радіус атома металів, порядковий номер, кореляційна аналіза, регресійна аналіза.

L.V. Bazyuk, H.O. Sirenko

Thermophysical Properties of Metals and Alloys: 3. Coefficient of Thermal Capacity Dependence from Temperature and Radius of Atoms

*Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

The dependence of coefficient of thermal capacity from temperature, serial number and radius of atom of metals has been analyzed and proved by correlation and regression analysis. It is shown that with increasing temperature for most metals and alloys thermal capacity increases. Established that growth between coefficient of thermal capacity and the radius of metal atoms no linear connection between a metals of periodic elements at temperatures 100, 200, 273, 298 and 700 K is close linear relationship.

Key words: metals, alloys, coefficient of thermal capacity, thermophysical properties, radius of metals atom, serial number, correlation analysis, regression analysis.

Стаття поступила до редакції 19.11.2011; прийнята до друку 25.01.2012.

Вступ

Відомо [1-28], що коефіцієнт теплоємності (c_p) за сталого тиску $p = \text{const}$ або питомого об'єму $v = \text{const}$ залежить від температури (T), але відсутні: ретельна аналіза цієї залежності для металів та сплавів, не приведені апроксимаційні функції, що описують ці залежності та не виявлений кореляційний зв'язок між коефіцієнтом

теплоємності та температурою, порядковим номером і радіусом атома першнів Періодичної таблиці.

Метою роботи є дослідження залежності коефіцієнта теплоємності від температури, радіусу та порядкового номера атомів металів Періодичної системи першнів і сплавів та пошуку кореляційних зв'язків і апроксимаційних математичних моделей між цими характеристиками.

I. Теоретична частина

1.1. Для аналізу використані табличні дані [1]. Кореляційні та регресійні аналізи виконані за [29–31]. Вибірковий коефіцієнт кореляції зв'язку (r_p) між y та x обчислювали за формулою [29, 30]. Висували нульову гіпотезу рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції

$$\left. \begin{array}{l} H_0: \rho = 0 \\ \uparrow \\ r_p \neq 0, \end{array} \right\} \quad (1)$$

та альтернативну гіпотезу

$$\left. \begin{array}{l} H_1: \rho \neq 0 \\ \uparrow \\ r_p \neq 0, \end{array} \right\} \quad (2)$$

де вибірковий коефіцієнт кореляції (r_p) був статистичною оцінкою генерального коефіцієнта кореляції (ρ):

$$r_p \rightarrow \rho.$$

Перевірку H_0 здійснювали для рівнів значущості $\alpha = 0,05$ та $\alpha = 0,01$ та ступенем вільностей f :

1. За критичним значенням коефіцієнта кореляції $r_{кр}$, [31]:

$$r_{кр.} = \frac{t_T}{\sqrt{f + t_T^2}}, \quad (3)$$

вибраного з табл. 11 [31] для $q = 1 - \alpha/2$ та $f = N - 2$, порівнюючи її з $|r_p|$, де $t_T \{ q = 1 - \alpha/2; f = N - 2 \}$. У табл. 11 [31] приведені нижні межі довірчої ділянки для абсолютного значення коефіцієнта кореляції. У разі виконання нерівності:

$$|r_p| < r_{кр.}, \quad (4)$$

то нульову гіпотезу H_0 приймали, що свідчить про відсутність статистичного надійного зв'язку між y та x , зі ступенем нелінійності:

$$\xi_1(r) = \frac{r_{кр.}}{|r_p|} > 1 \quad (5)$$

та ступенем залишків статистичної лінійності зв'язку у стохастичному зв'язку між y та x :

$$\xi_2(r) = \frac{|r_p|}{r_{кр.}} \leq 1. \quad (6)$$

У разі виконання нерівності:

$$|r_p| \geq r_{кр.}, \quad (7)$$

нульову гіпотезу H_0 відкидали, приймаючи альтернативну гіпотезу H_1 , що свідчить про наявність статистичного надійного лінійного зв'язку між y та x зі ступенем нелінійності:

$$\xi_2(r) = \frac{|r_p|}{r_{кр.}} \geq 1 \quad (8)$$

та ступенем залишків нелінійності зв'язку у стохастичному зв'язку між y та x :

$$\xi_1(r) = \frac{r_{кр.}}{|r_p|} < 1. \quad (9)$$

2. За критерієм Стьюдента t_T , розраховуючи статистику [30]:

$$t_p = \frac{r_p}{\sqrt{1 - r_p^2}} \sqrt{N - 2} \quad (10)$$

та порівнюючи цю статистику за абсолютною величиною $|t_p|$ з теоретичним значенням критерія Стьюдента t_T , вибраного з табл. 5 [31] для $q = 1 - \alpha/2$ та $f = N - 2$. У разі виконання нерівності:

$$|t_p| < t_T, \quad (11)$$

H_0 приймали, стверджуючи відсутність статистичного надійного зв'язку між y та x , зі ступенем нелінійності:

$$\xi_1(t) = \frac{t_T}{|t_p|} > 1 \quad (12)$$

та залишками лінійності у стохастичному зв'язку між y та x :

$$\xi_2(t) = \frac{|t_p|}{t_T} \leq 1. \quad (13)$$

У разі виконання нерівності:

$$|t_p| \geq t_T, \quad (14)$$

H_0 відкидали, приймаючи H_1 та стверджуючи наявність статистичного надійного лінійного зв'язку між y та x зі ступенем лінійності:

$$\xi_2(t) = \frac{|t_p|}{t_T} \geq 1 \quad (15)$$

та ступенем залишків нелінійності у стохастичному зв'язку між y та x :

$$\xi_1(t) = \frac{t_T}{|t_p|} < 1. \quad (16)$$

3. За перетворенням Фішера [30]:

$$z_p = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + r_p}{1 - r_p}, \quad (17)$$

порівнюючи розраховану статистику за абсолютною величиною $|z_p|$ з добутком $(z_T \cdot \sigma_z)$, де z_T – квантиль нормованого нормального розподілу, вибраного з табл. 1 [30] для $q = 1 - \alpha/2$; σ_z – розрахункове середнє квадратичне відхилення випадкової величини z , яка підпорядкована нормальному закону розподілу, за формулою [30]:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n - 3}}. \quad (18)$$

У разі виконання нерівності:

$$|z_p| < (z_T \cdot \sigma_z), \quad (19)$$

H_0 приймали, стверджуючи відсутність статистичного надійного лінійного зв'язку між y та x , зі ступенем нелінійності:

$$\xi_1(\dot{z}) = \frac{(z_T \cdot \sigma_z)}{|z_p|} > 1 \quad (20)$$

та залишками лінійності у стохастичному зв'язку між y і x :

$$\xi_2(\dot{z}) = \frac{|z_p|}{(z_T \cdot \sigma_z)} \leq 1. \quad (21)$$

У разі виконання нерівності:

$$|z_p| \geq (z_T \cdot \sigma_z), \quad (22)$$

H_0 відкидали, приймаючи H_1 та стверджуючи наявність статистичного надійного лінійного зв'язку між y та x зі ступенем лінійності:

$$\xi_2(\dot{z}) = \frac{|z_p|}{(z_T \cdot \sigma_z)} \geq 1 \quad (23)$$

та ступенем залишкової нелінійності у стохастичному зв'язку між y та x :

$$\xi_1(\dot{z}) = \frac{(z_T \cdot \sigma_z)}{|z_p|} < 1. \quad (24)$$

II. Результати та обговорення

2.1. Залежність коефіцієнта теплоємності металів від температури за низьких температур ($T \leq 200$ К).

1. На рис. 1 приведено лінійну (крива 1) та квадратичну (крива 1') залежності коефіцієнта теплоємності (c_p) металу IA групи Періодичної системи первнів літію від температури (T) в інтервалі температур 0-200 К. Як видно з рис. 1, коефіцієнт теплоємності літію інтенсивно зростає від $c_p = 0,082$ до $c_p = 0,501$ кДж/кг·К із збільшенням температури від ~ 0 К до 80 К. Подальше зростання температури від $T = 80$ К до $T = 200$ К приводить до незначного зростання коефіцієнта теплоємності літію від $c_p = 0,501$ до $c_p = 0,615$ кДж/кг·К

2. На рис. 2 приведено лінійні залежності коефіцієнта теплоємності (c_p) міді, срібла та золота від температури (T) в інтервалі температур 0-200 К. Як видно з рис. 2, для золота (крива 3) спостерігається зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 6 \cdot 10^{-6}$ до $c_p = 0,123$ кДж/кг·К, для срібла (крива 2) більш значне зростання від $c_p = 7,2 \cdot 10^{-6}$ до $c_p = 0,225$ кДж/кг·К, для міді (99,99%) (крива 1) c_p різко зростає від $14 \cdot 10^{-6}$ до $0,356$ кДж/кг·К із збільшенням температури від ~ 0 К до $T = 200$ К. При цьому коефіцієнт теплоємності зі зростанням порядкового номеру первня зменшується.

3. На рис. 3 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) магнію (99,9%) та

берилію (99,5%) від температури (T) в інтервалі температур 0-200 К. Як видно з рис. 3, коефіцієнт теплоємності магнію різко зростає від $c_p = 5,5 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,932$ кДж/кг·К із збільшенням температури від 1 К до 200 К, у той час як коефіцієнт теплоємності берилію незначно зростає від $c_p = 6 \cdot 10^{-6}$ до $c_p = 0,123$ кДж/кг·К із збільшенням температури від 1 К до $T = 100$ К. Залежності коефіцієнта теплоємності магнію та берилію від температури описуються як поліномом першого (криві 1, 2) так і другого (криві 1', 2') порядків.

4. На рис. 4 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) цинку та кадмію від температури (T) в інтервалі температур 0-200 К. Як видно з рис. 4, коефіцієнт теплоємності цинку (крива 1) інтенсивніше зростає від $c_p = 1,1 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,367$ кДж/кг·К, ніж коефіцієнт теплоємності кадмію (крива 2), що змінюється від $c_p = 0,8 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,222$ кДж/кг·К, із збільшенням температури від ~ 0 К до температури $T = 200$ К. Залежності коефіцієнта теплоємності цинку та кадмію від температури описуються поліномом другого порядку.

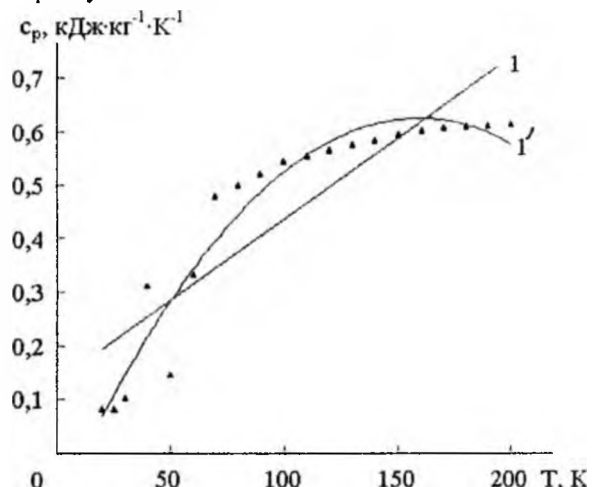


Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності літію ($Z = 3$): 1 – лінійна залежність; 1' – квадратична залежність.

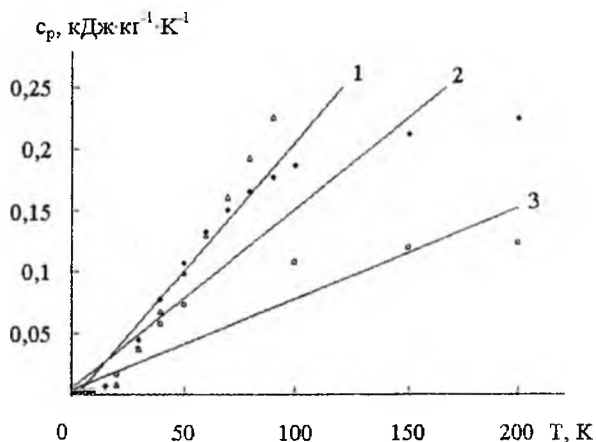


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – міді ($Z = 29$); 2 – срібла ($Z = 47$); 3 – золота ($Z = 79$).

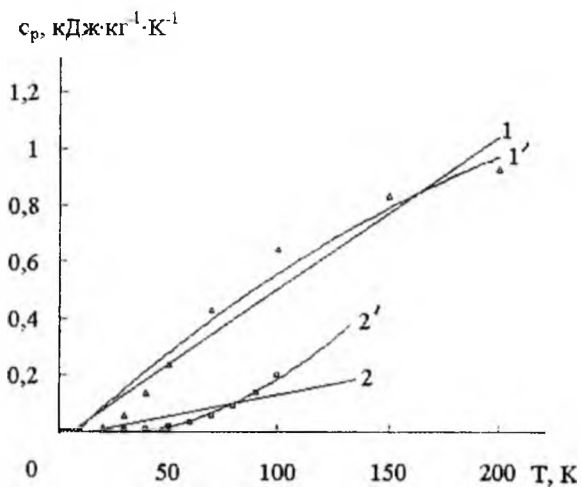


Рис. 3. Лінійна (1, 2) та квадратична (1', 2') залежність коефіцієнта теплоємності від температури: 1, 1' – магнію 99,9% ($Z = 12$); 2, 2' – берилію 99,5% ($Z = 4$).

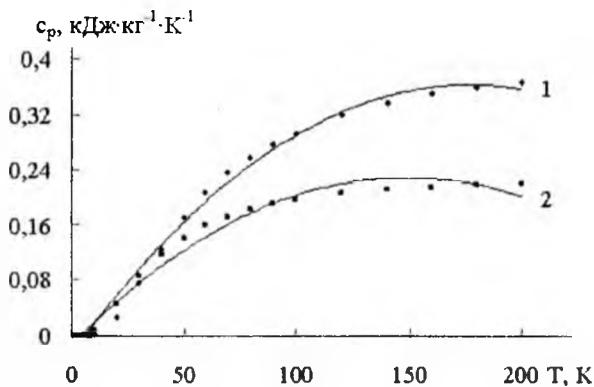


Рис. 4. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – цинку ($Z = 30$); 2 – кадмію ($Z = 48$).

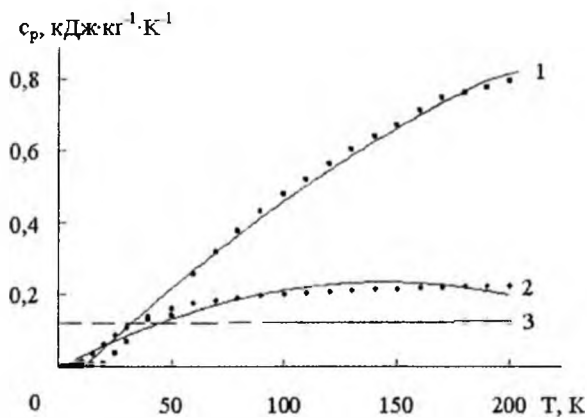


Рис. 5. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – алюмінію 99,99% ($Z = 13$); 2 – індію ($Z = 49$); 3 – талію ($Z = 81$).

5. На рис. 5 приведено квадратичну (криві 1, 2) та лінійну (крива 3) залежності коефіцієнта теплоємності (c_p) металів головної підгрупи III групи Періодичної системи первнів – алюмінію, індію і талію – від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 5, для алюмінію 99,99% (крива 1) спостерігається різке

зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 1,1 \cdot 10^{-4}$ до $c_p = 0,797$ кДж/кг·К при зростанні температури від 2 К до 200 К. Для індію (крива 2) підвищення температури від 1 К до 200 К приводить до незначного зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 2,9 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,225$ кДж/кг·К. Для талію (крива 3) із зростанням температури від 100 К до 200 К c_p майже не змінюється від 0,124 до 0,127 кДж/кг·К. При цьому коефіцієнт теплоємності зі зростанням порядкового номеру первня зменшується.

6. На рис. 6 приведено лінійну (крива 1) та квадратичну (крива 1') залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) скандію від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 6, зі збільшенням температури від 0 до 200 К коефіцієнт теплоємності скандію інтенсивно зростає від $c_p = 2,67 \cdot 10^{-4}$ до $c_p = 0,52$ кДж/кг·К.

7. На рис. 7 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи IV групи Періодичної системи первнів – титану, цирконію, гафнію – від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 7, для титану технічного та титану 99,9% коефіцієнт теплоємності із зміною температури змінюється по-різному: для титану технічного (крива 1) із зростанням температури від 100 К до 200 К c_p майже не змінюється від 0,543 до 0,553 кДж/кг·К, тоді як для титану 99,9% спостерігається різке зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 3,17 \cdot 10^{-4}$ до $c_p = 0,465$ кДж/кг·К при підвищенні температури від 4 К до 200 К. Для цирконію та гафнію (рис. 7, крива 3 та 4 відповідно) спостерігається значно менше зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 0,012$ до $c_p = 0,267$ кДж/кг·К (для цирконію) та від $c_p = 0,0008$ до $c_p = 0,14$ кДж/кг·К (для гафнію) із збільшенням температури від ~ 0 К до ~ 200 К. При цьому коефіцієнт теплоємності зі зростанням порядкового номеру первня зменшується.

8. На рис. 8 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) олова та свинцю від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 8, коефіцієнт теплоємності олова (крива 1) інтенсивніше зростає від $c_p = 1,7 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,214$ кДж/кг·К, ніж коефіцієнт теплоємності свинцю (крива 2), що змінюється від $c_p = 2,6 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,125$ кДж/кг·К, із збільшенням температури від ~ 0 К до температури $T = 200$ К. Залежності коефіцієнта теплоємності олова та свинцю від температури описуються поліномом другого порядку.

9. На рис. 9 приведено лінійну (крива 1) та квадратичні (крива 2, 3) залежності коефіцієнта теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи V групи Періодичної системи первнів – ванадію, ніобію, танталу – від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 9, коефіцієнт теплоємності ванадію (крива 1) із зростанням температури від 100 К до 200 К c_p майже не

змінюється від 0,48 до 0,499 кДж/кг·К. Для ніобію і танталу (рис. 9, крива 2 та 3 відповідно) спостерігається значно більше зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 9 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,254$ кДж/кг·К (для ніобію) та від $c_p = 3,2 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,134$ кДж/кг·К (для танталу) із збільшенням температури від ~ 0 К до ~ 200 К. При цьому коефіцієнт теплоємності зі зростанням порядкового номеру первня зменшується.

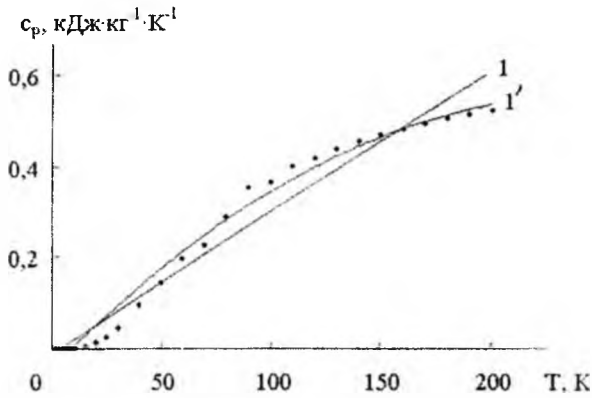


Рис. 6. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності скандію ($Z = 21$): 1 – лінійна залежність; 1' – квадратична залежність.

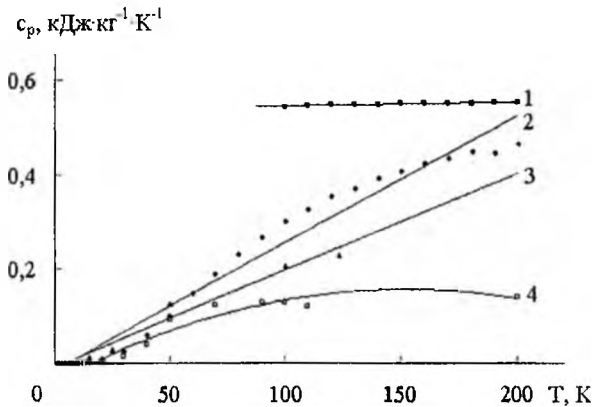


Рис. 7. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – титану технічного; 2 – титану 99,90% ($Z = 22$); 3 – цирконію ($Z = 40$); 4 – гафнію ($Z = 72$).

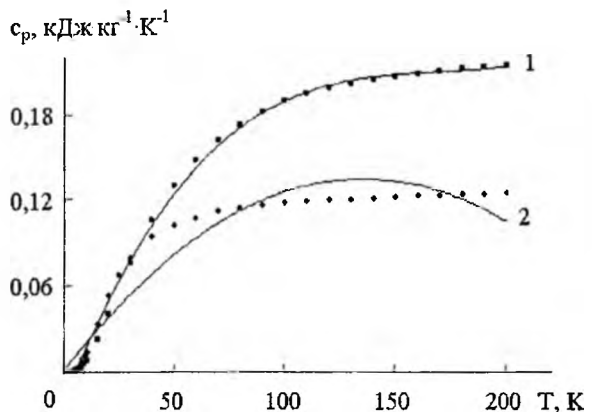


Рис. 8. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – олова ($Z = 50$); 2 – свинцю ($Z = 82$).

10. На рис. 10 приведено лінійні залежності коефіцієнта теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи VI групи Періодичної системи первнів – хрому, молібдену та вольфраму – від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 10, для вольфраму (крива 3) спостерігається зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 7,4 \cdot 10^{-6}$ до $c_p = 0,125$ кДж/кг·К, для молібдену (крива 2) більш значне зростання від $c_p = 2,29 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,222$ кДж/кг·К, для хрому (крива 1) c_p різко зростає від $2,85 \cdot 10^{-5}$ до 0,385 кДж/кг·К із збільшенням температури від ~ 0 К до $T = 200$ К. При цьому коефіцієнт теплоємності зі зростанням порядкового номеру первня зменшується.

11. На рис. 11 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) α - та γ -заліза від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 11, коефіцієнт теплоємності γ -заліза (крива 2) інтенсивніше зростає від $c_p = 0$ до $c_p = 0,452$ кДж/кг·К, ніж коефіцієнт теплоємності α -заліза (крива 1), що змінюється від $c_p = 0$ до $c_p = 0,384$ кДж/кг·К із збільшенням температури від ~ 0 К до $T = 200$ К. Залежності коефіцієнта теплоємності α - та γ -заліза від температури описуються поліномом першого порядку.

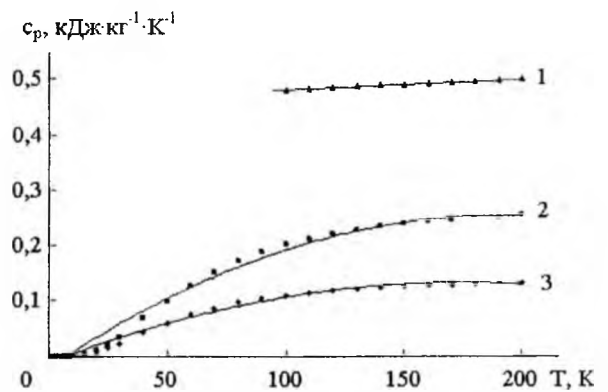


Рис. 9. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – ванадію ($Z = 23$); 2 – ніобію ($Z = 41$); 3 – танталу ($Z = 73$).

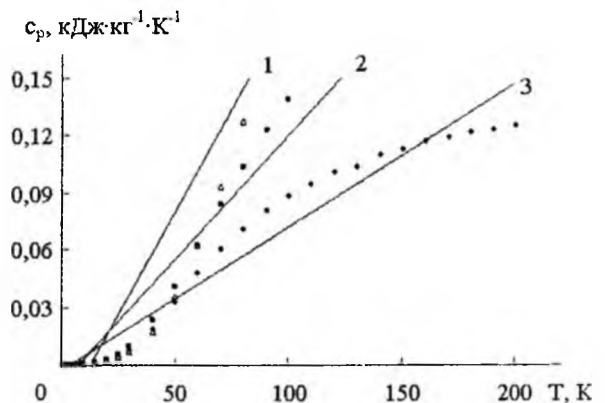


Рис. 10. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – хрому ($Z = 24$); 2 – молібдену ($Z = 42$); 3 – вольфраму ($Z = 74$).

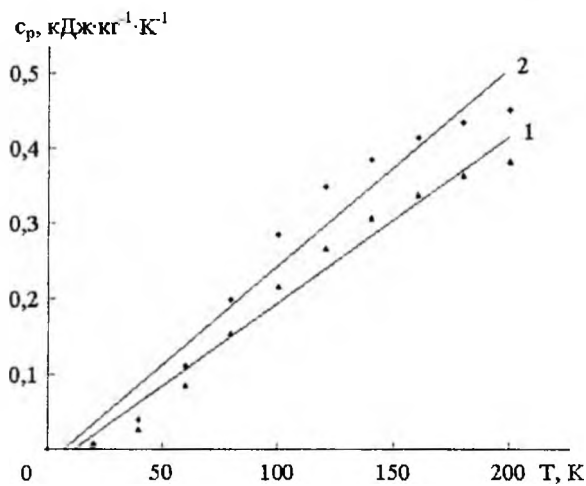


Рис. 11. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – α -заліза; 2 – γ -заліза.

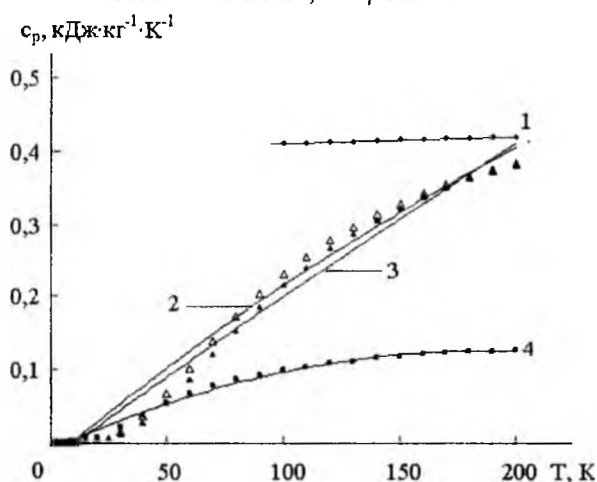


Рис. 12. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – кобальту ($Z=27$); 2 – ніколу ($Z=28$); 3 – заліза ($Z=26$); 4 – платини ($Z=78$).

12. На рис. 12 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) кобальту, ніколу, заліза та платини від температури (T) в інтервалі температур 0–200 К. Як видно з рис. 12, коефіцієнт теплоємності кобальту (крива 1) із зростанням температури від 100 К до 200 К c_p майже не змінюється від 0,41 до 0,42 кДж/кг·К. Для ніколу та заліза (рис. 12, крива 2 та 3 відповідно) спостерігається різке зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 12 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,383$ кДж/кг·К (для ніколу) та від $c_p = 9 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,384$ кДж/кг·К (для заліза) із збільшенням температури від ~ 0 К до 200 К. Коефіцієнт теплоємності платини (крива 4) незначно зростає від $c_p = 3,5 \cdot 10^{-5}$ до $c_p = 0,127$ кДж/кг·К із збільшенням температури від ~ 0 К до 200 К. Залежність коефіцієнта теплоємності кобальту від температури описується поліномом першого (крива 1), а залежності коефіцієнта теплоємності заліза, ніколу та платини (криві 2, 3 і 4) від температури – поліномом другого порядку.

2.2. Залежність коефіцієнта теплоємності металів від температури за високих температур у межах від 200 до 2860 К.

За даними [1] побудовано температурні залежності металів відносно c_p за високих температур ($T \geq 200$ К).

1. На рис. 13. приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) лужних металів Періодичної системи первнів від температури (T). Як видно з рис. 13, із збільшенням температури від $T \approx 200$ до $T \approx 400$ К коефіцієнт теплоємності всіх лужних металів незначно зростає: літійу (крива 1) від $c_p = 0,615$ до $c_p = 0,643$ кДж/кг·К, натрію (крива 2) від $c_p = 1,18$ до $c_p = 1,358$ кДж/кг·К, калію (крива 3) $c_p = 0,49$ до $c_p = 0,846$ Вт/м·К, і не залежить від порядкового номеру (Z) первня.

2. На рис. 14 приведено залежність теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи I групи Періодичної системи первнів від температури (T). Як видно з рис. 14, коефіцієнт теплоємності металів: міді (крива 1), срібла (крива 2), золота (крива 3) зі збільшенням температури від $T = 200$ до $T = 1200$ К лінійно зростає від $c_p = 0,356$ до $c_p = 0,502$ кДж/кг·К (для міді), від $c_p = 0,225$ до $c_p = 0,267$ кДж/кг·К (для срібла) та від $c_p = 0,123$ до $c_p = 0,142$ Вт/м·К (для золота) і залежить від порядкового номеру первня відповідного металу.

3. На рис. 15. приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) металів II групи Періодичної системи первнів: берилію 99,90%, магнію 99,97%, кальцію, стронцію та барію від температури (T). Як видно з рис. 15, зі збільшенням температури від $T = 200$ до $T \approx 1200$ К коефіцієнт теплоємності берилію (крива 1) різко зростає від $c_p = 1,70$ до $c_p = 3,28$ кДж/кг·К, а коефіцієнт теплоємності решти металів (криві 2-5) незначно зростає від $c_p = 0,932$ до $c_p = 1,30$ кДж/кг·К (для магнію), від $c_p = 0,613$ до $c_p = 0,991$ кДж/кг·К (для кальцію), від $c_p = 0,268$ до $c_p = 0,448$ кДж/кг·К (для стронцію), від $c_p = 0,192$ до $c_p = 0,329$ кДж/кг·К (для барію), а залежність $c_p \sim f(T)$ носить лінійний характер. При цьому коефіцієнт теплоємності зі зростанням порядкового номеру первня відповідного металу зменшується.

4. На рис. 16. приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи II групи Періодичної системи первнів – цинку та кадмію – від температури (T). Як видно з рис. 16, зі зростанням температури від $T = 200$ до $T = 473$ К коефіцієнт теплоємності лінійно зростає від $c_p = 0,367$ до $c_p = 0,390$ кДж/кг·К (для цинку) та від $c_p = 0,222$ до $c_p = 0,247$ кДж/кг·К (для кадмію), а зі збільшенням порядкового номеру відповідного металу коефіцієнт теплоємності зменшується.

5. На рис. 17 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) металів IIIA групи Періодичної системи первнів: алюмінію, галію, індію, талію – від температури (T). Як видно з рис. 17, з підвищенням температури від $T = 200$ до 500 К для алюмінію і талію (криві 1, 4 відповідно) та від $T = 200$ до $T = 300$ К для галію та індію (криві 2, 3 відповідно) спостерігається незначне зростання коефіцієнта теплоємності: від $c_p = 0,797$ до $c_p =$

0,992 кДж/кг·К (для алюмінію), від $c_p = 0,330$ до $c_p = 0,346$ кДж/кг·К (для галію), від $c_p = 0,225$ до $c_p = 0,233$ кДж/кг·К (для індію) та від $c_p = 0,127$ до $c_p = 0,142$ кДж/кг·К (для талію). Зі збільшенням порядкового номеру відповідного металу коефіцієнт теплоємності зменшується.

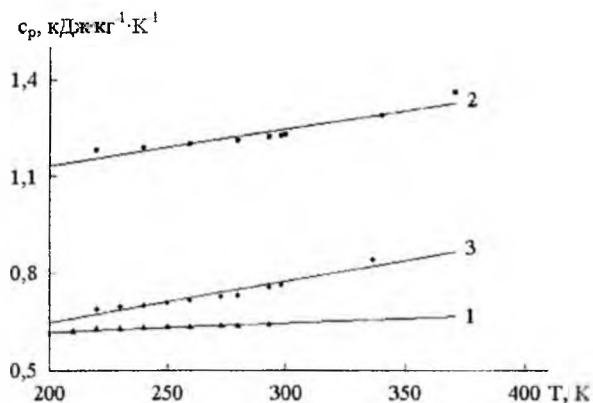


Рис. 13. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – літію ($Z=3$); 2 – натрію ($Z=11$); 3 – калію ($Z=19$).

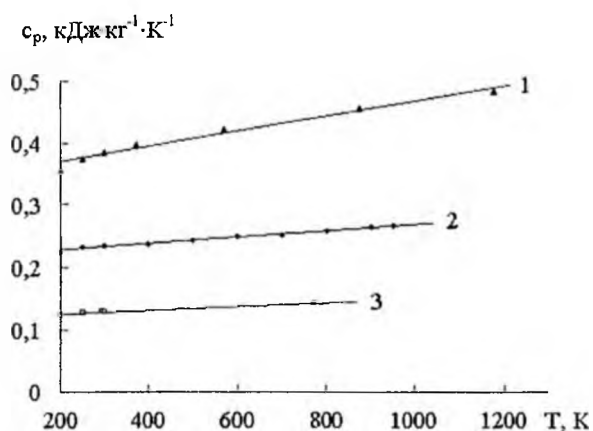


Рис. 14. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – міді 99,99% ($Z=29$); 2 – срібла ($Z=47$); 3 – золота ($Z=79$).

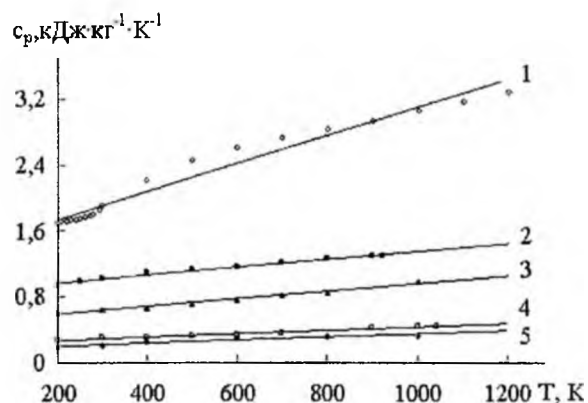


Рис. 15. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – берилію 99,90% ($Z=4$); 2 – магнію 99,97% ($Z=12$); 3 – кальцію ($Z=20$), 4 – стронцію ($Z=38$), 5 – барію ($Z=56$).

6. На рис. 18 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) титану 99,85%, титану 99,90% та технічного титану від температури (T) в інтервалі температур 200–300 К (рис. 18 а) та залежність коефіцієнта теплоємності технічного титану від температури (T) в інтервалі температур 200–1900 К (рис. 18 б). Аналіза рис. 18 а показала, що зі зростанням температури від $T = 200$ К до $T = 300$ К коефіцієнт теплоємності титану 99,85% (крива 1), титану 99,90% (крива 2) та технічного титану (крива 3) лінійно зростає. Найвищі його значення спостерігаються для технічного титану. Як видно з рис. 18 б, коефіцієнт теплоємності технічного титану незначно зростає від $c_p = 0,553$ до $c_p = 0,636$ кДж/кг·К з підвищенням температури від $T = 200$ до $T = 1473$ К. Подальше зростання температури від $T = 1473$ до $T = 1900$ К приводить до більш значного зростання від $c_p = 0,636$ до $c_p = 0,912$ кДж/кг·К. Залежність $c_p \sim f(T)$ описується рівнянням другого порядку.

7. На рис. 19 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи IV групи Періодичної системи первнів – олова та свинцю – від температури (T). Як видно з рис. 19, зі зростанням температури від $T = 200$ до $T \approx 400$ К для олова (крива 1) та від $T = 200$ до $T \approx 600$ К для свинцю (крива 2) коефіцієнт теплоємності лінійно зростає від $c_p = 0,214$ до $c_p = 0,243$ кДж/кг·К (для олова) та від $c_p = 0,125$ до $c_p = 0,142$ кДж/кг·К (для свинцю), а зі збільшенням порядкового номеру відповідного металу коефіцієнт теплоємності зменшується.

8. На рис. 20 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи V групи Періодичної системи первнів від температури (T). З рис. 20 видно, що з підвищенням температури від $T=200$ до $T=1773$ К (для ванадію) та від $T=200$ до $T \sim 3000$ К (для ніобію та танталу) коефіцієнт теплоємності V (крива 1), Nb (крива 2), Ta (крива 3) незначно зростає від $c_p = 0,499$ до $c_p = 0,816$ кДж/кг·К (для ванадію), від $c_p = 0,254$ до $c_p = 0,425$ кДж/кг·К (для ніобію) та від $c_p = 0,134$ до $c_p = 0,134$ кДж/кг·К (для танталу).

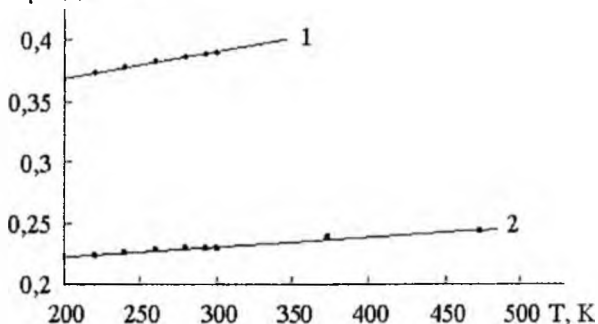


Рис. 16. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – цинку ($Z = 30$); 2 – кадмію ($Z = 48$).

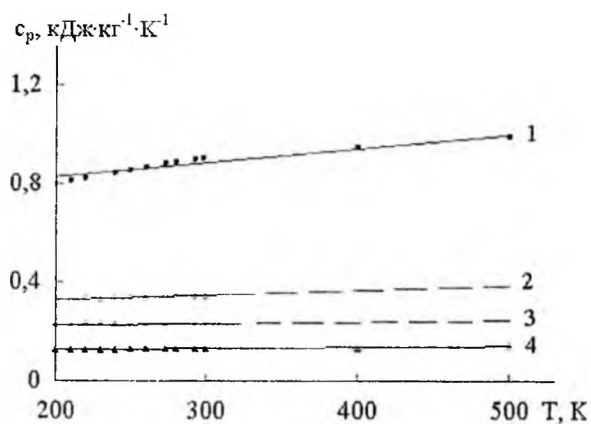


Рис. 17. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – алюмінію ($Z = 13$); 2 – галію ($Z = 31$); 3 – індію ($Z = 49$); 4 – талію ($Z = 81$).

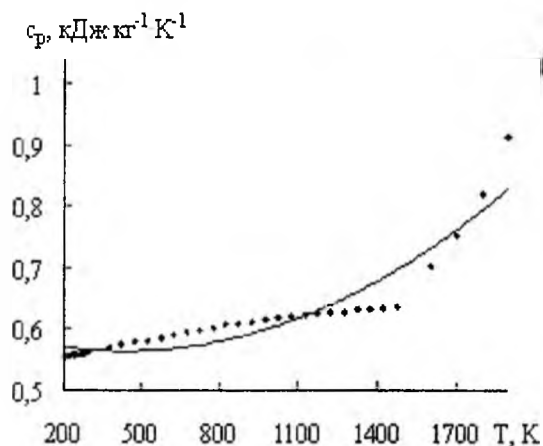
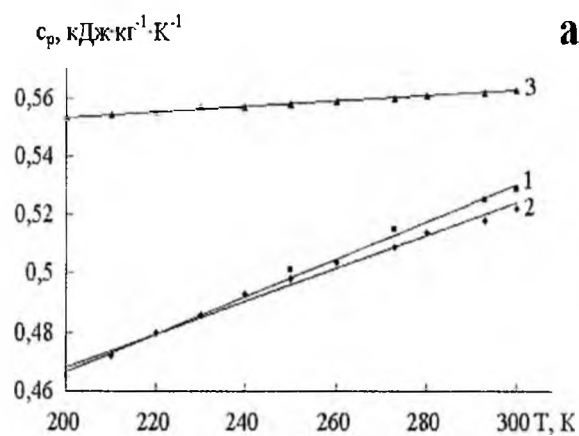


Рис. 18. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: а) титану 99,85% (крива 1); титану 99,90% (крива 2); технічного титану ($Z=22$) в інтервалі температур 200–300 К; б) технічного титану ($Z=22$) в інтервалі температур 200–1900 К.

$c_p = 0,217$ кДж/кг·К (для танталу), при цьому із зростанням порядкового номеру первня коефіцієнт теплоємності зменшується.

9. На рис. 21 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) металів побічної підгрупи VI групи Періодичної системи первнів від температури (T). Як видно з рис. 21, з підвищенням

температури від $T = 200$ до $T = 2860$ К спостерігається незначне зростання коефіцієнта теплоємності металів Мо (крива 2) від $c_p = 0,217$ до $c_p = 0,523$ кДж/кг·К та W 99,92% (крива 3) від $c_p = 0,132$ до $c_p = 0,186$ кДж/кг·К, а також інтенсивне зростання коефіцієнта теплоємності Cr (крива 1) від $c_p = 0,385$ до $c_p = 1,121$ кДж/кг·К, при цьому коефіцієнт теплоємності даних металів залежить від їх порядкового номеру в Періодичній системі первнів.

10. На рис. 22 приведено лінійну залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) мангану від температури (T). Як видно з рис. 22, з підвищенням температури від $T = 200$ до $T = 1500$ К спостерігається лінійне зростання коефіцієнта теплоємності Mn від $c_p = 0,444$ до $c_p = 0,862$ кДж/кг·К.

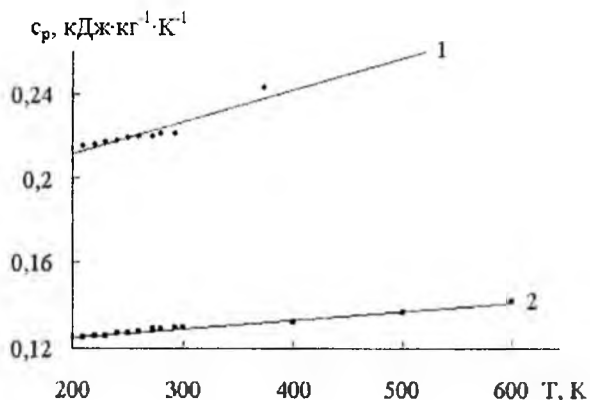


Рис. 19. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – олова ($Z = 50$); 2 – свинцю ($Z = 82$).

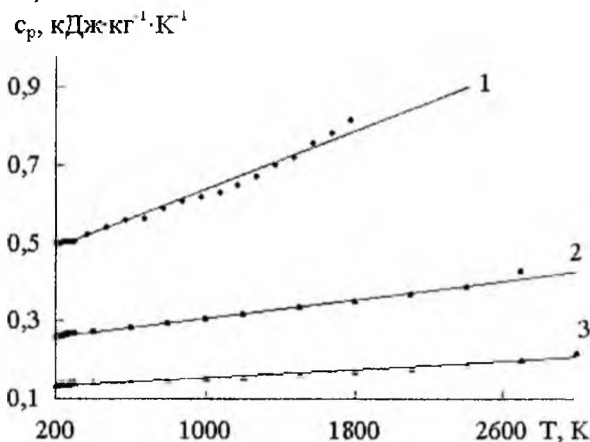


Рис. 20. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – ванадію ($Z=23$); 2 – ніобію ($Z=41$); 3 – танталу ($Z=73$).

11. На рис. 23 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) α -заліза та ніколу 99,97% від температури (T). Як видно з рис. 23, коефіцієнт теплоємності α -заліза (крива 1) інтенсивно зростає від $c_p = 0,384$ до $c_p = 1,611$ кДж/кг·К, у той час як коефіцієнт теплоємності ніколу (крива 2) незначно змінюється від $c_p = 0,501$ до $c_p = 0,668$ кДж/кг·К із збільшенням температури від $T=200$ К (для α -заліза) та від $T=360$ К (для ніколу)

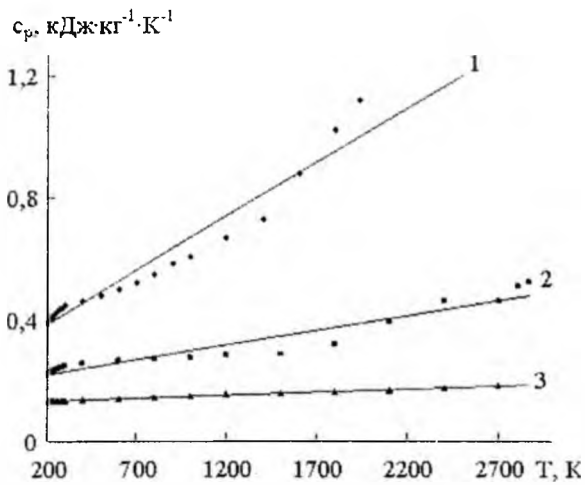


Рис. 21. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – хрому ($Z = 24$); 2 – молібдену ($Z = 42$); 3 – вольфраму 99,92% ($Z = 74$).

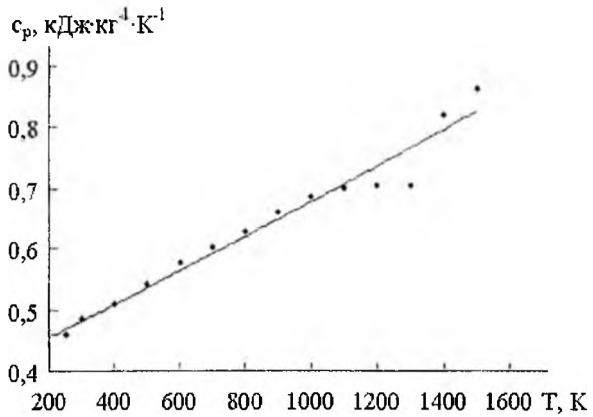


Рис. 22. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності мангану ($Z = 25$).

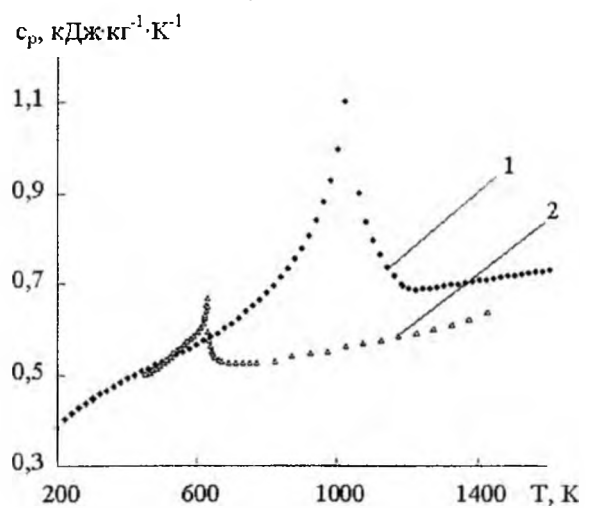


Рис. 23. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – α -заліза; 2 – ніколу 99,97%.

до температури піка максимального його значення ($T_{\max} = 1042,15$ K для α -заліза та $T_{\max} = 630,2$ K для ніколу 99,97%). Після піку максимуму коефіцієнт теплоємності обох металів спадає від $c_p = 1,611$ до $c_p = 0,688$ кДж/кг·К (для α -заліза) та від $c_p = 0,668$ до $c_p = 0,525$ кДж/кг·К (для ніколу 99,97%) під час

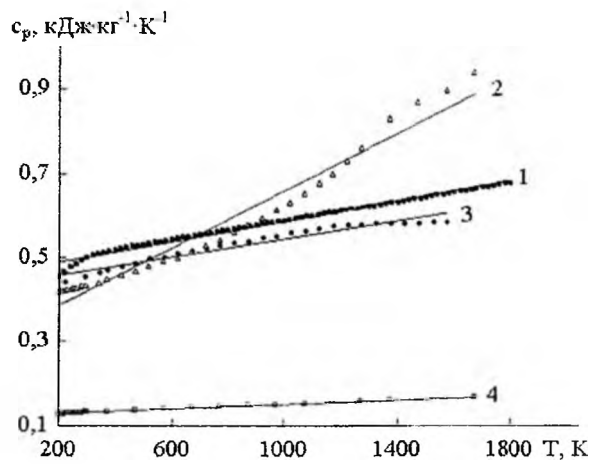


Рис. 24. Температурна залежність коефіцієнта теплоємності: 1 – γ -заліза ($Z=26$); 2 – кобальту ($Z=27$); 3 – ніколу 99,99% ($Z=28$) 4 – платини ($Z=78$).

збільшення температури від T_{\max} до 1220 K (для α -заліза) та до 753 K (для ніколу 99,97%). Подальше підвищення температури від $T = 1120$ K до ~ 1800 K (для α -заліза) та від $T = 753$ K до 1423 K (для ніколу 99,97%) приводить до незначного зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 0,688$ до $c_p = 0,755$ кДж/кг·К (для α -заліза) та від $c_p = 0,525$ до $c_p = 0,638$ кДж/кг·К (для ніколу 99,97%).

12. На рис. 24 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) γ -заліза, кобальту, ніколу 99,99% та платини від температури (T). Як видно з рис. 24, зі зростанням температури від $T \approx 200$ до $T \approx 1800$ K коефіцієнт теплоємності γ -заліза (крива 1), ніколу 99,99% (крива 3) та платини (крива 4) незначно зростає від $c_p = 0,452$ до $c_p = 0,680$ кДж/кг·К (для γ -заліза), від $c_p = 0,442$ до $c_p = 0,586$ кДж/кг·К (для ніколу 99,99%) від $c_p = 0,127$ до $c_p = 0,168$ кДж/кг·К (для платини). Коефіцієнт теплоємності кобальту (крива 2) зростає значно інтенсивніше від $c_p = 0,420$ до $c_p = 0,940$ кДж/кг·К під час зростання температури від $T = 200$ до $T = 1670$ K.

2.3. Залежність коефіцієнта теплоємності сполук від температури.

За даними [1] побудовано температурні залежності сполук відносно коефіцієнта теплоємності.

1. На рис. 25 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) мідних сполук різних марок від температури (T). Як видно з рис. 25 а, зі зростанням температури від $T = 300$ до $T = 750$ K коефіцієнт теплоємності мідного сполу $\text{Cu} + 1,8\% \text{Ve}$ зростає від $c_p = 0,460$ до $c_p = 0,669$ кДж/кг·К, а залежність $c_p \sim f(T)$ носить лінійний характер. Як видно з рис. 25 б, коефіцієнт теплоємності мідного сполу $\text{Cu} + 10\% \text{Zn}$ незначно зростає від $c_p = 0,414$ до $c_p = 0,460$ кДж/кг·К під час збільшення температури від $T = 300$ до $T = 950$ K, а залежність носить квадратичний характер. Аналіза рис. 25 в і г привела до висновку, що зі зростанням температури від ~ 60 до $T = 300$ K коефіцієнт теплоєм-

ности спадає інтенсивніше від $c_p = 0,196$ до $c_p = 0,460$ кДж/кг·К (рис. 25 г), ніж коефіцієнт теплоємності мосяжу від $c_p = 0,180$ до $c_p = 0,391$ кДж/кг·К (рис. 25 в). Як видно з рис. 25 д, коефіцієнт теплоємності мідного стопу $\text{Cu} + 40\%\text{Zn} + 1,23\%\text{Fe} + 0,76\%\text{Mn}$ зростає від $c_p = 0$ до $c_p = 0,385$ кДж/кг·К під час збільшення температури від $T = 0$ до $T = 300$ К, а залежність $c_p \sim f(T)$ носить нелінійний характер.

2. На рис. 26 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) стопів титану: технічного титану ВТ 1 (нелегованого), ВТ 6 (Ti + 6%Al + 4%V), ВТ 14 (Ti + 4,5%Al + 3%Mo + 1%V) від температури (T). Як видно з рис. 26, коефіцієнт

теплоємності усіх стопів титану збільшується зі зростанням температури. В інтервалі температур 0–200 К коефіцієнт теплоємності стопів ВТ 1, ВТ 6 та ВТ 14 однаковий. Залежність описується поліноміальним рівнянням.

3. На рис. 27 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) нержавіючих та жаростійких криць (сталей) марки: 1X18H9T, X17H13M2T, 12X18H10T, 4X13 від температури (T). З рис. 27 видно, що зі зростанням температури коефіцієнт теплоємності цих сталей збільшується, а залежність $c_p \sim f(T)$ носить лінійний характер. Найвищі його значення спостерігаються у сталі 1X18H9T.

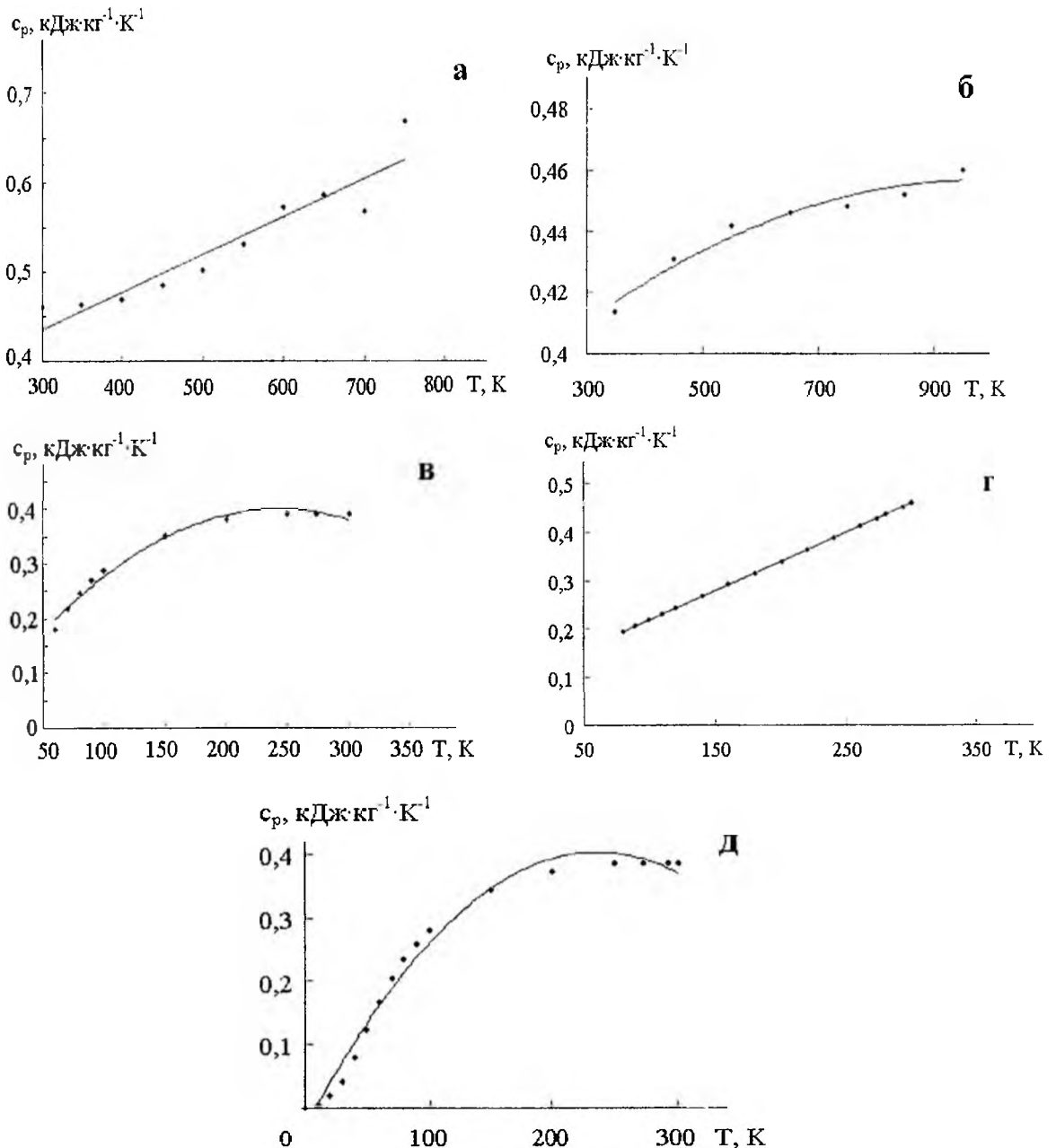


Рис. 25. Температурні залежності коефіцієнта теплоємності мідних стопів: а) $\text{Cu} + 1,8\%\text{Be}$; б) $\text{Cu} + 10\%\text{Zn}$ (латунь); в) мосяжу $\text{Cu} + 40\%\text{Zn} + 0,15\%\text{Fe}$ (латунь Л69); г) сплаву $\text{Cu} + 0,8\%\text{Cr} + 0,01\%\text{Zn}$ (бронза БрХ0,8); д) мосяжу $\text{Cu} + 40\%\text{Zn} + 1,23\%\text{Fe} + 0,76\%\text{Mn}$ (латунь ЛЖМц 59-1-1).

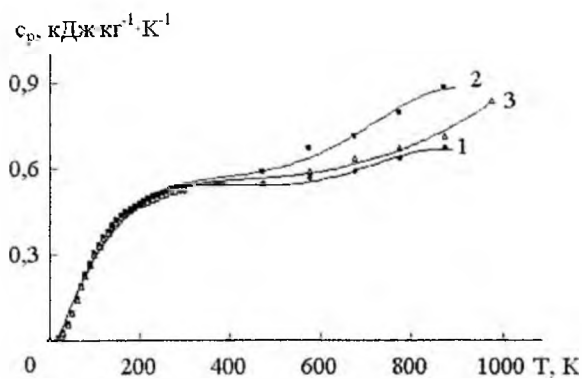


Рис. 26. Залежність коефіцієнта теплоємності титанових стопів від температури: 1 – технічного титану ВТ 1 (нелегованого); 2 – стопу титану ВТ 6 (Ti + 6%Al + 4%V); 3 – стопу ВТ 14 (Ti + 4,5%Al + 3%Mo + 1%V).

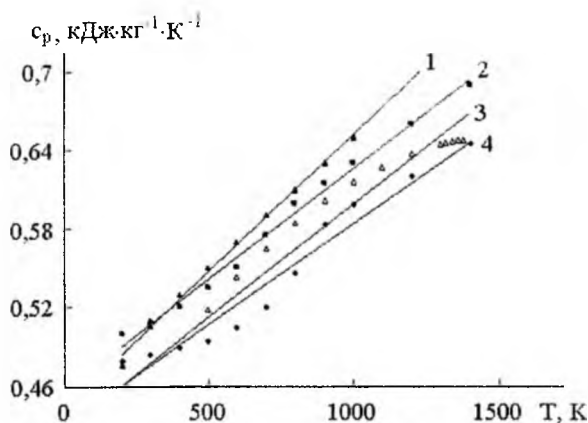


Рис. 27. Залежність коефіцієнта теплоємності нержавіючих та жаростійких криць від температури: 1 – сталь 1X18H9T [Fe + 0,1%С + 18%Cr + 9%Ni + (<1,5%)Ti]; 2 – сталь X17H13M2T [Fe + 17%Cr + 13%Ni + 2%Mo + (<1,5%)Ti]; 3 – сталь 12X18H10T [Fe + 1,2%С + 18%Cr + 10%Ni + (<1,5%)Ti]; 4 – сталь 4X13 [Fe + 0,4%С + 13%Cr].

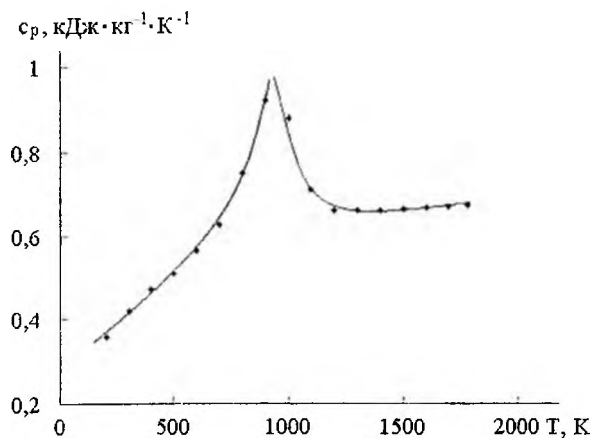


Рис. 28. Залежність теплоємності вуглецевої сталі (Fe + 0,4%С + 1%Mn + 0,1%Si + 0,1%P + 0,05%S) від температури.

4. На рис. 28 приведено залежність коефіцієнта теплоємності (c_p) вуглецевої сталі від температури (T). Як видно з рис. 28, коефіцієнт теплоємності вуглецевої сталі різко зростає від $c_p=0,356$

до $c_p = 0,920$ кДж/кг·К із збільшенням температури від 200 К до $T_{\max} = 800$ К. З подальшим підвищенням температури від $T_{\max} = 800$ К до 1400 К коефіцієнт теплоємності дещо зменшується від $c_p = 0,920$ до $c_p = 0,660$ кДж/кг·К, а в інтервалі температур 1400 – 1780 К спостерігається незначне зростання коефіцієнта теплоємності від $c_p = 0,660$ до $c_p = 0,673$ кДж/кг·К, що не є характерним для всіх інших стопів.

2.4. Залежність коефіцієнта теплоємності від температури (регресійна аналіза).

Шукали апроксимацію $c_p \sim f(T)$ у вигляді поліному першого ($y=ax+b$) і другого ($y = ax^2+bx+c$) порядків, де $y = c_p$, $x = T$. Ступінь адекватності поліномів експериментальним даним оцінювали за коефіцієнтом апроксимації R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{ад}}}{SS_{\{y\}}}, \quad (25)$$

де $SS_{\text{ад}}$ – сума квадратів під час розрахунку дисперсії адекватності;

$SS_{\{y\}}$ – сума квадратів під час розрахунку дисперсії відновлення;

$$0 \leq R^2 \leq 1. \quad (26)$$

Результати регресійної аналізи зведено у табл. 1 для металів та у табл. 2 для стопів. Як видно з табл. 1, у всіх металів для залежностей $c_p \sim f(T)$ за низьких ($T \leq 200$ К) та високих ($T \geq 200$ К) температур існує надійний зв'язок при апроксимації як поліномом першого порядку, так і поліномом другого порядку (окрім олова, залежність $c_p \sim f(T)$ якого за низьких ($T \leq 200$ К) температур апроксимується поліномом третього порядку).

Як видно з табл. 2, у більшості стопів для залежностей $c_p \sim f(T)$ існує надійний зв'язок при апроксимації поліномом першого порядку (окрім, стопів латуні (Cu + 10%Zn, ЛЖМц 59-1-1 та Л 69), залежність $c_p \sim f(T)$ яких апроксимується поліномом другого порядку та титанових стопів (ВТ 1, ВТ 6 та ВТ 14) залежність $c_p \sim f(T)$ яких апроксимується поліномом п'ятого порядку).

2.5. Залежність коефіцієнта теплоємності від радіусу атома первня та його порядкового номеру в Періодичній системі первнів (кореляційна аналіза).

У табл. 3 зведено значення коефіцієнта теплоємності за температури 100; 200; 273; 298,15 та 700 К, а також порядковий номер Z та радіус атома r_A для 40 металів [1].

На рис. 29-33 приведено залежності коефіцієнта теплоємності 40 металів [1] від порядкового номера (Z) та радіусу атома (r_A) за температури 100; 200; 273; 298,15 та 700 К. Як видно з рис. 29-33, між коефіцієнтом теплоємності та радіусом атома немає лінійного зв'язку за температур 100; 200; 273; 298,15 та 700 К (рис. 29-33 а). Залежність коефіцієнта теплоємності від порядкового номера металу в Періодичній системі первнів апроксимується степеневою функцією за температур 100; 200; 273; 298,15 та 700 К (рис. 29-33б).

Таблиця 1

Лінійна та поліноміальна моделі залежності коефіцієнта теплоємності металів від температури

Метал	Радіус атома, нм	$y = ax + b$	R^2	$y = ax^2 + bx + c$ або $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$	R^2	Інтервал температур
Li	0,155	$y=0,003x + 0,1365$ $y=0,0003x + 0,5681$	0,7677 0,914	$y=-3 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0091x - 0,1025$ $y=-3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0016x + 0,407$	0,9363 0,9840	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Na	0,190	— $y=0,0011x + 0,9069$	— 0,8908	— $y=8 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0035x + 1,5726$	— 0,9973	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
K	0,235	— $y=0,0013x + 0,3948$	— 0,9289	— $y=9 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0038x + 1,083$	— 0,9975	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Cu 99,99%	0,128	$y=0,0021x - 0,0049$ $y=0,0001x + 0,3463$	0,9542 0,9806	$y=-5 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0031x - 0,0238$ $y=-4 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0002x + 0,3296$	0,9800 0,9895	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Ag	0,144	$y=0,0015x + 0,0044$ $y=5 \cdot 10^{-5}x + 0,2179$	0,8814 0,9872	$y=-8 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0029x - 0,0179$ $y=-3 \cdot 10^{-9}x^2 + 5 \cdot 10^{-5}x + 0,2171$	0,9859 0,9873	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Au	0,146	$y=0,0007x + 0,0034$ $y=3 \cdot 10^{-5}x + 0,119$	0,8823 0,9672	$y=-5 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0017x - 0,008$ $y=-6 \cdot 10^{-8}x^2 + 9 \cdot 10^{-5}x + 0,1075$	0,9875 0,9976	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Be 99,5% 99,90%	0,112	$y=0,0046x - 0,1143$ $y=0,002x + 1,3$ $y=0,0015x + 1,4634$	0,7998 1 0,9723	$y=4 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0016x + 0,0075$ $y=-7 \cdot 10^{-18}x^2 + 0,002x + 1,3$ $y=-7 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0026x + 1,1743$	0,9972 1 0,9942	$T \leq 200$ К $T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Mg 99,9% 99,97%	0,160	$y=0,0054x - 0,0277$ $y=0,0005x + 0,8665$	0,9634 0,9873	$y=-1 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0072x - 0,0553$ $y=-2 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0007x + 0,8067$	0,9740 0,9958	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Ca	0,197	$y=0,0068x + 0,0753$ $y=0,0005x + 0,4983$	0,8463 0,9718	$y=-5 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0158x - 0,06$ $y=3 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0001x + 0,5842$	0,9842 0,9969	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Sr	0,215	— $y=0,0002x + 0,2282$	— 0,9791	— $y=7 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0001x + 0,2515$	— 0,9852	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Ba	0,222	— $y=0,0002x + 0,1686$	— 0,8972	— $y=-2 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0005x + 0,1002$	— 0,9786	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Zn	0,138	$y=0,0022x + 0,0113$ $y=0,0002x + 0,3239$	0,9127 0,9918	$y=-1 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0044x - 0,0251$ $y=-7 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0006x + 0,2823$	0,9924 0,9985	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Cd	0,154	$y=0,0014x + 0,0203$ $y=8 \cdot 10^{-5}x + 0,2066$	0,835 0,9709	$y=-1 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0032x - 0,0114$ $y=-7 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0001x + 0,1989$	0,9858 0,9769	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Al 99,99%	0,143	$y=0,0046x - 0,0326$ $y=0,0006x + 0,7134$	0,9829 0,9877	$y=-8 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0061x - 0,0671$ $y=7 \cdot 10^{-9}x^2 + 0,0006x + 0,7149$	0,9903 0,9877	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Ga	0,139	— $y=0,0002x + 0,2883$	— 0,9754	— $y=-1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0009x + 0,1997$	— 0,9974	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
In	0,166	$y=0,0013x + 0,0318$ $y=7 \cdot 10^{-5}x + 0,211$	0,8166 0,9636	$y=-1 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0033x - 0,0052$ $y=-1 \cdot 10^{-8}x^2 + 8 \cdot 10^{-5}x + 0,2103$	0,9745 0,9637	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Tl	0,171	$y=3 \cdot 10^{-5}x + 0,121$ $y=4 \cdot 10^{-5}x + 0,1185$	0,9066 0,7318	$y=1 \cdot 10^{-7}x^2 - 3 \cdot 10^{-6}x + 0,1232$ $y=1 \cdot 10^{-7}x^2 - 5 \cdot 10^{-5}x + 0,1321$	0,9164 0,9434	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Ti (техн.)	0,147	$y=9 \cdot 10^{-5}x + 0,5356$ $y=1 \cdot 10^{-4}x + 0,5339$	0,9501 0,9904	$y=-4 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0002x + 0,5266$ $y=-8 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0001x + 0,5291$	0,9672 0,9909	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Ti 99,90%	0,147	$y=0,0027x - 0,0146$ $y=0,0006x + 0,3559$	0,9763 0,989	$y=-5 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0037x - 0,0318$ $y=-2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0016x + 0,2308$	0,9859 0,9990	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К
Ti 99,85%	0,147	— $y=0,0006x + 0,3388$	— 0,9944	— $y=-2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0015x + 0,2376$	— 0,9999	$T \leq 200$ К $T \geq 200$ К

Sn	0,162	$y = 0,0013x + 0,0197$ $y = 0,0002x + 0,1812$	0,8655 0,8778	$y = 4 \cdot 10^{-8}x^3 - 2 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0039x - 0,0188$ $y = 9 \cdot 10^{-7}x^2 - 0,0003x + 0,2484$	0,9958 0,9792	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Pb	0,175	$y = 0,0007x + 0,0252$ $y = 4 \cdot 10^{-5}x + 0,1171$	0,7394 0,9816	$y = -7 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,002x + 0,0019$ $y = -2 \cdot 10^{-10}x^2 + 4 \cdot 10^{-5}x + 0,1171$	0,9406 0,9816	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
V	0,134	$y = 0,0002x + 0,4615$ $y = 0,0002x + 0,4509$	0,9982 0,9852	$y = 6 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0002x + 0,4628$ $y = 5 \cdot 10^{-8}x^2 + 9 \cdot 10^{-5}x + 0,4763$	0,9983 0,9962	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Nb	0,146	$y = 0,0015x + 0,0033$ $y = 6 \cdot 10^{-5}x + 0,2457$	0,934 0,991	$y = -8 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0029x - 0,0213$ $y = 6 \cdot 10^{-9}x^2 + 5 \cdot 10^{-5}x + 0,2501$	0,9891 0,9942	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Ta	0,149	$y = 0,0008x + 0,0042$ $y = 3 \cdot 10^{-5}x + 0,1297$	0,9146 0,9758	$y = -5 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0017x - 0,0111$ $y = 5 \cdot 10^{-9}x^2 + 1 \cdot 10^{-5}x + 0,1345$	0,9898 0,9948	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Cr	0,130	$y = 0,0022x - 0,0275$ $y = 0,0004x + 0,3136$	0,9765 0,9473	$y = 2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0017x - 0,0202$ $y = 2 \cdot 10^{-7}x^2 + 3 \cdot 10^{-5}x + 0,4071$	0,9795 0,9908	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Mo	0,139	$y = 0,0013x - 0,0097$ $y = 0,0001x + 0,2024$	0,9772 0,9315	$y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0016x - 0,016$ $y = 4 \cdot 10^{-8}x^2 - 4 \cdot 10^{-6}x + 0,2353$	0,9825 0,9793	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
W	0,141	$y = 0,0007x - 0,003$ $y = 0,00002x + 0,128$	0,9621 0,9968	$y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0012x - 0,0104$ $y = 1 \cdot 10^{-9}x^2 + 2 \cdot 10^{-5}x + 0,1288$	0,9838 0,9977	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Mn	0,132	- $y = 0,0003x + 0,3952$	- 0,964	- $y = 2 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0003x + 0,4039$	- 0,9644	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Fe γ -Fe	0,126	$y = 0,0022x - 0,0215$ $y = 0,0001x + 0,4648$	0,9826 0,9883	$y = -7 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0023x - 0,0238$ $y = -2 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0002x + 0,4509$	0,9828 0,9920	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Co	0,125	$y = 0,0001x + 0,4$ $y = 0,0003x + 0,3209$	1 0,9631	$y = -3 \cdot 10^{-18}x^2 + 0,0001x + 0,4$ $y = 2 \cdot 10^{-7}x^2 + 7 \cdot 10^{-5}x + 0,3987$	1 0,9966	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Ni	0,124	$y = 0,0022x - 0,0156$ $y = 0,0001x + 0,4381$	0,9821 0,9478	$y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0027x - 0,0238$ $y = -7 \cdot 10^{-8}x^2 + 0,0002x + 0,3928$	0,9854 0,9980	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$
Pt	0,139	$y = 0,0008x + 0,0037$ $y = 3 \cdot 10^{-5}x + 0,1242$	0,9317 0,9954	$y = -4 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0015x - 0,0089$ $y = -3 \cdot 10^{-9}x^2 + 3 \cdot 10^{-5}x + 0,1227$	0,9932 0,9972	$T \leq 200 \text{ K}$ $T \geq 200 \text{ K}$

Таблиця 2

Математичні моделі залежностей теплоємності стопів від температури

Стопи	Рівняння апроксимації	R ²
Cu + 1,8% Be	$y = 0,0004x + 0,3085$	0,8891
Cu + 10%Zn (латунь)	$y = -1 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0002x + 0,3604$	0,9556
Латунь ЛЖМц 59-1-1	$y = -8 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0037x - 0,0305$	0,9840
Латунь Л69	$y = -6 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,003x + 0,0431$	0,9844
Бронза БрХ0,8	$y = 0,0012x + 0,0993$	1,0
ВТ 1	$y = -4 \cdot 10^{-15}x^5 + 1 \cdot 10^{-12}x^4 + 1 \cdot 10^{-8}x^3 - 1 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0047x - 0,0754$	0,9902
ВТ 6	$y = -3 \cdot 10^{-15}x^5 - 2 \cdot 10^{-12}x^4 + 1 \cdot 10^{-8}x^3 - 1 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0049x - 0,0801$	0,9914
ВТ 14	$y = 5 \cdot 10^{-15}x^5 - 2 \cdot 10^{-11}x^4 + 2 \cdot 10^{-8}x^3 - 2 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,005x - 0,0831$	0,9907
1Х18Н9Т	$y = 0,0002x + 0,4567$	0,9915
Х17Н13М2Т	$y = 0,0002x + 0,4428$	0,9954
12Х18Н10Т	$y = 0,0002x + 0,426$	0,9365
4Х13	$y = 0,0002x + 0,4305$	0,9522

Залежність коефіцієнта теплоємності металів та сплавів від температури, радіусу атомів та порядкового номера в Періодичній системі елемента

Метал	Порядковий номер Z	Радіус атома r_A , нм	c_p , кДж/кг·К				
			100 К	200 К	273 К	298,15 К	700 К
Li (98,5%)	3	0,155	0,544	0,615	0,640	0,644	--
Na	11	0,190	--	1,170	1,210	1,227	--
K	19	0,235	--	0,680	0,730	0,766	--
Rb	37	0,248	--	0,321	--	0,363	--
Cs	55	0,267	--	0,209	--	0,242	--
Cu	29	0,128	0,254	0,356	0,380	0,386	0,435
Ag	47	0,144	0,187	0,225	0,233	0,235	0,252
Au	79	0,146	0,108	0,123	0,128	0,129	0,140
Be (99,9%)	4	0,112	1,500	1,700	1,780	1,880	2,720
Mg (99,97%)	12	0,160	0,649	0,932	0,990	1,010	1,210
Ca	20	0,197	--	0,613	0,630	0,647	0,809
Sr	38	0,215	--	0,268	--	0,306	0,360
Ba	56	0,222	--	0,192	--	0,205	0,309
Zn	30	0,138	0,293	0,367	--	0,389	--
Cd	48	0,154	0,196	0,222	0,228	0,229	--
Hg	80	0,157	0,141	0,139	--	--	--
Al (99,994%)	13	0,143	0,481	0,797	0,881	0,904	1,090
Ga	31	0,139	--	--	0,342	0,346	--
In	49	0,166	0,203	0,225	0,230	0,233	--
Tl	81	0,171	0,124	0,127	0,130	0,130	--
Sc	21	0,164	0,364	0,520	0,560	0,570	--
Ti (99,9%)	22	0,147	0,300	0,465	0,509	0,519	--
Zr	40	0,160	0,205	0,260	0,270	0,276	0,333
Hf	72	0,159	0,127	0,140	--	0,146	--
Sn (білий)	50	0,162	0,189	0,214	0,220	0,221	--
V	23	0,134	0,480	0,499	0,502	0,502	--
Nb	41	0,146	0,202	0,254	0,265	0,268	0,287
Ta	73	0,149	0,111	0,134	0,138	0,140	0,147
Cr	24	0,130	0,193	0,385	0,437	0,448	0,524
Mo	42	0,139	0,139	0,222	0,241	0,246	0,265
W	74	0,141	0,131	0,132	0,134	0,134	0,142
Mn	25	0,132	0,268	0,444	--	0,480	0,602
Re	75	0,137	0,084	0,133	0,138	--	--
Fe	26	0,126	0,216	0,384	0,434	0,446	0,625
Co	27	0,125	0,410	0,420	0,431	0,436	0,520
Ni (99,99%)	28	0,124	0,423	0,440	--	0,458	0,522
Rh	45	0,134	0,147	0,220	0,239	0,243	--
Pd	46	0,137	0,167	0,227	0,240	0,243	--
Ir	77	0,136	0,092	0,121	0,131	0,134	--
Pt	78	0,139	0,100	0,127	0,132	0,133	0,144

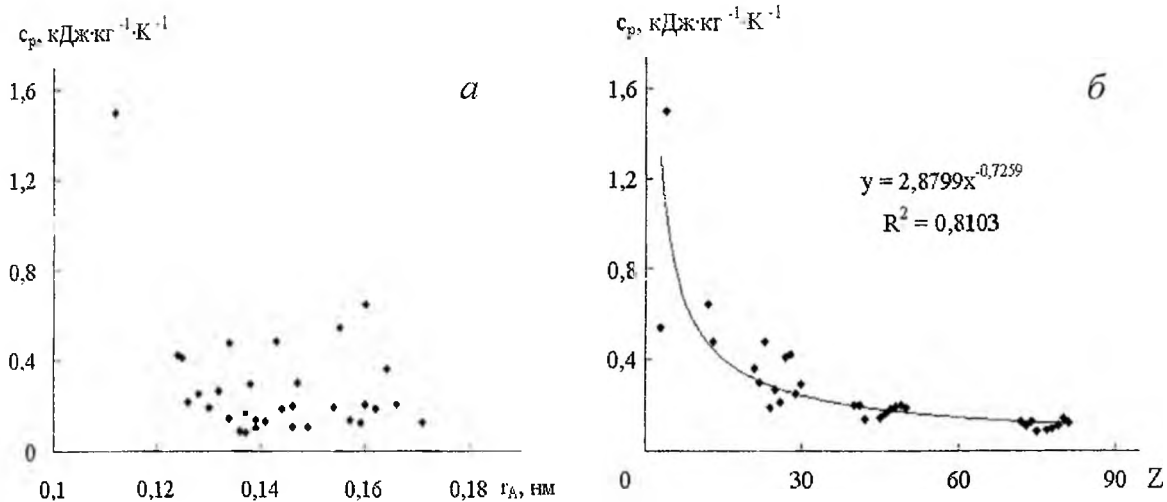


Рис. 29. Узагальнена залежність коефіцієнта теплоємності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 100 К.

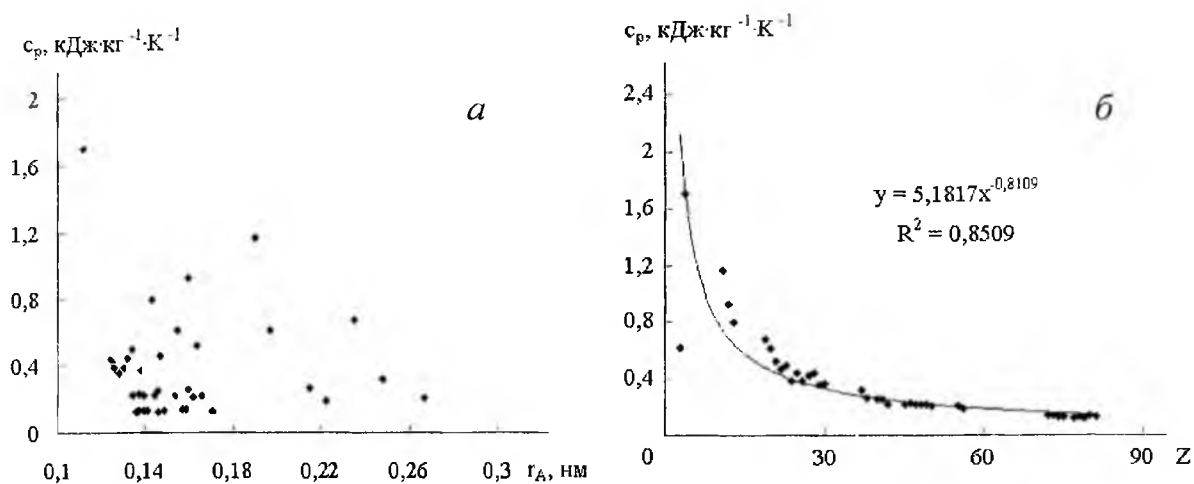


Рис. 30. Узагальнена залежність коефіцієнта теплоємності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 200 К.

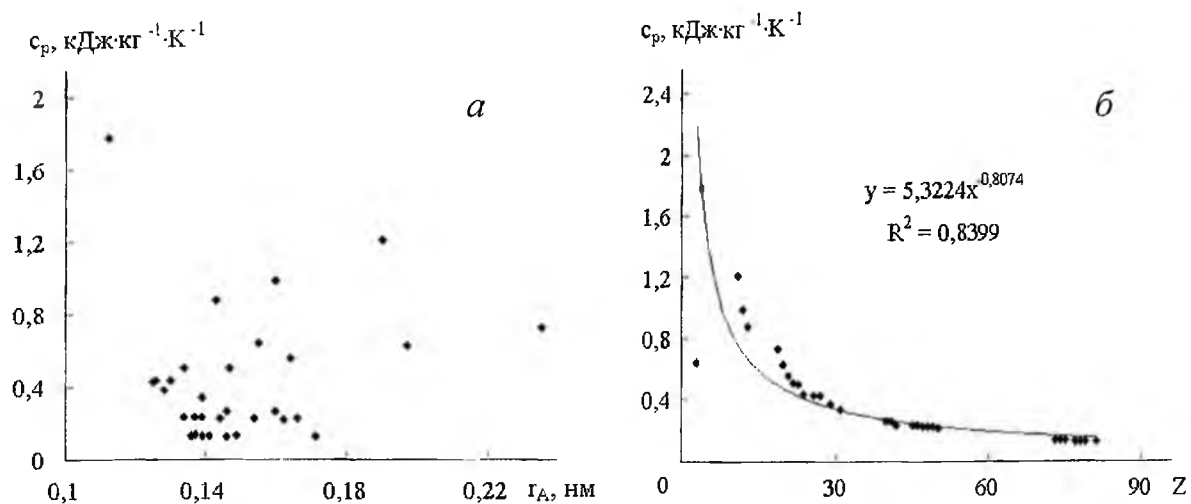


Рис. 31. Узагальнена залежність коефіцієнта теплоємності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 273 К.

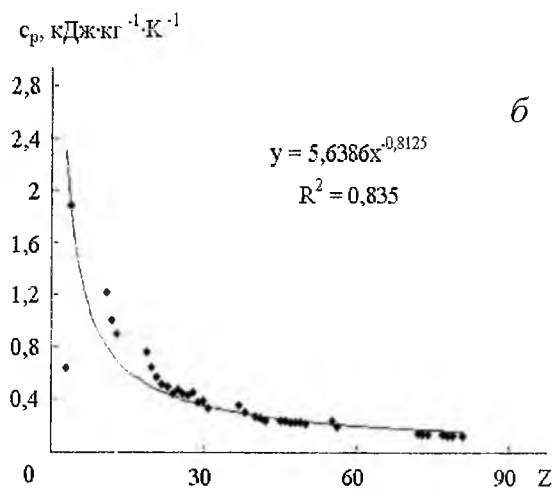
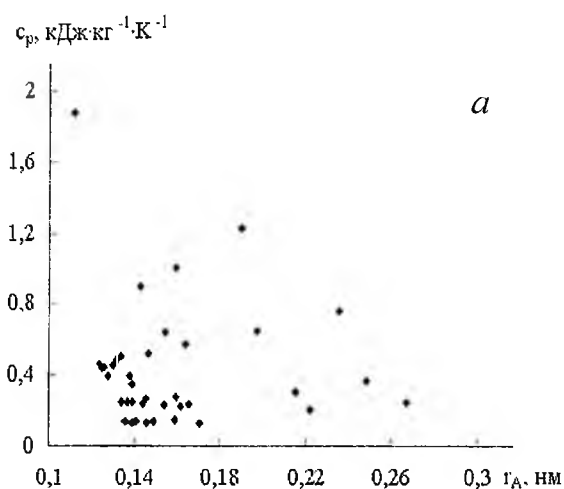


Рис. 32. Узагальнена залежність коефіцієнта теплоємності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 298,15 К.

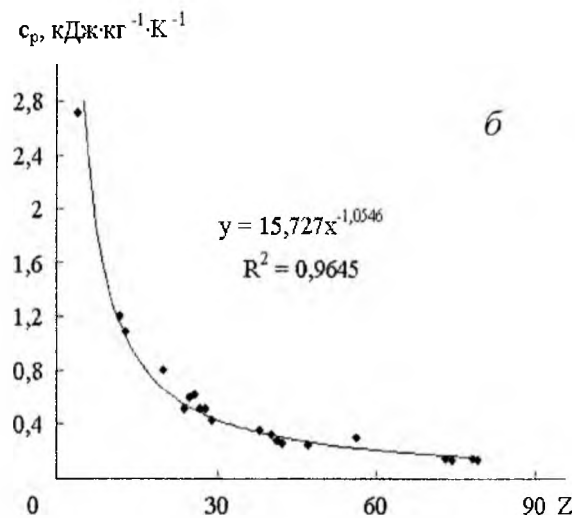
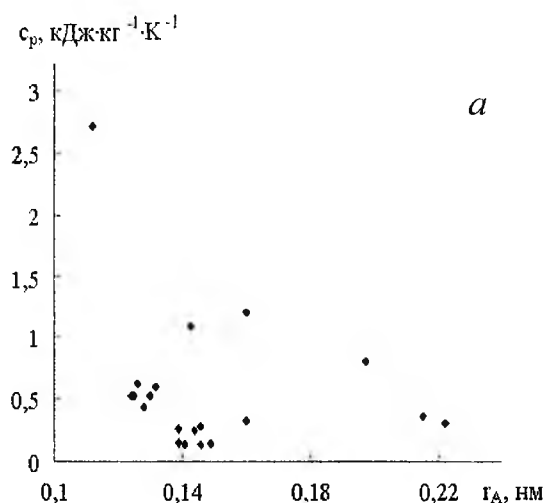


Рис. 33. Узагальнена залежність коефіцієнта теплоємності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 700 К.

У табл. 4 зведено результати перевірки нульової гіпотези H_0 рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції залежностей $c_p = f(Z)$ та $c_p = f(r_A)$. Як видно з табл. 4, ступінь лінійності для кореляційного зв'язку «коефіцієнт теплоємності c_p від порядкового номера первня Z у Періодичній системі первнів» складає:

- для $\alpha = 0,05$ $\xi_2(r) = 1,60 - 2,43$; $\xi_2(t) = 2,04 - 3,59$; $\xi_2(Z) = 1,87 - 3,10$ (для всіх температур);
- для $\alpha = 0,01$ $\xi_2(r) = 1,27 - 1,88$; $\xi_2(t) = 1,49 - 2,68$; $\xi_2(Z) = 1,42 - 2,35$ (для всіх температур), а ступінь нелінійності у цьому зв'язку складає:
- для $\alpha = 0,05$ $\xi_1(r) = 0,41 - 0,63$; $\xi_1(t) = 0,28 - 0,49$; $\xi_1(Z) = 0,32 - 0,54$ (для всіх температур);
- для $\alpha = 0,01$ $\xi_1(r) = 0,53 - 0,79$; $\xi_1(t) = 0,37 - 0,67$; $\xi_1(Z) = 0,43 - 0,71$ (для всіх температур).

І, навпаки, для кореляційного зв'язку «коефіцієнт теплоємності c_p від радіусу атома r_A » ступінь лінійності дорівнює:

- для $\alpha = 0,05$ $\xi_2(r) = 0,18 - 1,01$; $\xi_2(t) = 0,17 - 1,01$; $\xi_2(Z) = 0,17 - 1,01$ (для всіх температур);
- для $\alpha = 0,01$ $\xi_2(r) = 0,14 - 0,79$; $\xi_2(t) = 0,13 - 0,75$; $\xi_2(Z) = 0,13 - 0,77$ (для всіх температур), а ступінь нелінійності у цьому зв'язку складає:
- для $\alpha = 0,05$ $\xi_1(r) = 0,99 - 5,62$; $\xi_1(t) = 0,99 - 5,92$; $\xi_1(Z) = 0,99 - 5,80$;
- для $\alpha = 0,01$ $\xi_1(r) = 1,27 - 7,25$; $\xi_1(t) = 1,34 - 7,93$; $\xi_1(Z) = 1,30 - 7,64$,

що дозволяє зробити висновок: узагальнена залежність $c_p = f(Z)$ для 40 металів та інтервалу температур 100-700 К є лінійною, з вищим ступенем нелінійності, а залежність $c_p = f(r_A)$ для 40 металів та інтервалу температур 100-700 К є нелінійною з високим ступенем нелінійності.

Пояснити виявлені властивості можна наступним чином. Під час кристалізації металів (наприклад, у процесі охолодження розтопів) одночасно утворюється величезна кількість дрібних кристаліків, які заважають один одному вирости і

набути правильної форми. Тому будь-який металевий виріб має полікристалічну структуру, що складається із великої кількості дрібних кристаліків – так званих кристалітів, або зерен, які на відміну від чітко огранених монокристалів інших

неорганічних речовин мають неправильну форму і різну просторову орієнтацію. З цієї причини у кристалічній структурі металів виникають дефекти, які суттєво впливають на фізичні властивості металів.

Таблиця 4

Результати перевірки нульової гіпотези рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції зв'язків $c_p \sim Z$, $c_p \sim r_A$ за його критичним значенням ($r_{кр}$), критерієм Стюдента (t_T) та перетворенням Фішера (z_T)

Зв'язки між величинами		Рівні значущості	$c_p, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$				
			100 К	200 К	273 К	298,15 К	700 К
Кореляційний зв'язок:			Розрахунковий коефіцієнт кореляції (r_p)				
$c_p \sim Z$			-0,6742	-0,7668	-0,7725	-0,7595	-0,7103
$c_p \sim r_A$			-0,3521	-0,0562	0,1159	-0,0617	-0,2440
N			32	39	31	38	20
f = N-2			30	37	29	36	18
			Критичний коефіцієнт кореляції				
$r_{кр} \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}; f = N-2\}$		$\alpha = 0,05$	0,3494	0,3160	0,3550	0,3202	0,4438
		$\alpha = 0,01$	0,4487	0,4076	0,4556	0,4128	0,5614
$c_p \sim Z$	$\xi_1(r)$	$\alpha = 0,05$	0,518	0,412	0,460	0,422	0,625
			$\xi_2(r)$	1,930	2,427	2,176	2,372
	$\xi_1(r)$	$\alpha = 0,01$	0,666	0,532	0,590	0,544	0,790
			$\xi_2(r)$	1,503	1,881	1,696	1,840
$c_p \sim r_A$	$\xi_1(r)$	$\alpha = 0,05$	0,992	5,623	3,063	5,190	1,819
			$\xi_2(r)$	1,008	0,178	0,327	0,193
	$\xi_1(r)$	$\alpha = 0,01$	1,274	7,253	3,931	6,690	2,301
			$\xi_2(r)$	0,785	0,138	0,254	0,150
Кореляційний зв'язок:			Статистика Стюдента (t_p)				
$c_p \sim Z$			5,0000	7,2665	6,5511	7,0053	4,2812
$c_p \sim r_A$			2,0605	0,3424	0,6284	0,3709	1,0675
$t_T \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}; f = N-2\}$		$\alpha = 0,05$	2,042	2,026	2,045	2,028	2,101
		$\alpha = 0,01$	2,750	2,716	2,756	2,719	2,878
$c_p \sim Z$	$\xi_1(t)$	$\alpha = 0,05$	0,408	0,279	0,312	0,290	0,491
			$\xi_2(t)$	2,449	3,587	3,204	3,454
	$\xi_1(t)$	$\alpha = 0,01$	0,550	0,374	0,421	0,399	0,672
			$\xi_2(t)$	1,818	2,676	2,377	2,576
$c_p \sim r_A$	$\xi_1(t)$	$\alpha = 0,05$	0,991	5,917	3,254	5,468	1,968
			$\xi_2(t)$	1,009	0,169	0,307	0,183
	$\xi_1(t)$	$\alpha = 0,01$	1,335	7,931	4,386	7,331	2,696
			$\xi_2(t)$	0,749	0,126	0,228	0,136
Кореляційний зв'язок:			Статистика перетворення Фішера (z_p)				
$c_p \sim Z$			0,8184	1,0125	1,0265	0,9950	0,8878
$c_p \sim r_A$			0,3681	0,0563	0,1164	0,0618	0,2490
$z_T \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}\}$		$\alpha = 0,05$	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
		$\alpha = 0,01$	2,58	2,58	2,58	2,58	2,58
σ_Z			0,1857	0,1667	0,1890	0,1690	0,2425
$(z_T \cdot \sigma_Z)$		$\alpha = 0,05$	0,3640	0,3267	0,3704	0,3312	0,4753
		$\alpha = 0,01$	0,4791	0,4301	0,4876	0,4360	0,6257
$c_p \sim Z$	$\xi_1(Z)$	$\alpha = 0,05$	0,445	0,323	0,361	0,333	0,535
			$\xi_2(Z)$	2,248	3,099	2,771	3,004
	$\xi_1(Z)$	$\alpha = 0,01$	0,585	0,425	0,475	0,438	0,705
			$\xi_2(Z)$	1,708	2,354	2,105	2,282
$c_p \sim r_A$	$\xi_1(Z)$	$\alpha = 0,05$	0,989	5,803	3,182	5,359	1,909
			$\xi_2(Z)$	1,011	0,172	0,314	0,187
	$\xi_1(Z)$	$\alpha = 0,01$	1,302	7,639	4,189	7,055	2,513
			$\xi_2(Z)$	0,768	0,131	0,239	0,142

Висновки

1. За літературними даними досліджено температурну залежність коефіцієнта теплоємності металів та сплавів, при цьому встановлено, що за низьких температур ($T \leq 200$ К) коефіцієнт теплоємності більшості металів інтенсивно зростає, а за високих температур в межах від 200 до 300-3000 К коефіцієнт теплоємності більшості металів з підвищенням температури незначно зростає, окрім α -заліза та ніколу (99,97%), коефіцієнт теплоємності яких з підвищенням температури інтенсивно зростає до температури піка максимального його значення; із подальшим підвищенням температури коефіцієнт теплоємності цих металів різко зменшується, а потім поступово збільшується.

2. Встановлено, що коефіцієнт теплоємності більшості досліджених сплавів з підвищенням температури зростає, окрім вуглецевої сталі, коефіцієнт теплоємності якої із підвищенням температури інтенсивно зростає до температури піка максимального його значення; із подальшим підвищенням температури коефіцієнт теплоємності цього сплаву різко зменшується, а потім поступово збільшується.

3. Отримані апроксимаційні залежності коефіцієнта теплоємності від температури для 40 металів та сплавів. Встановлено, що для залежностей

коефіцієнта теплоємності металів від температури існує надійний зв'язок при апроксимації як поліномом першого порядку, так і поліномом другого порядку, окрім стануму, залежність коефіцієнта теплоємності від температури якого за низьких ($T \leq 200$ К) температур апроксимується поліномом третього порядку. Для більшості сплавів залежність коефіцієнта теплоємності від температури апроксимується поліномом першого порядку, окрім сплавів латуні (Cu + 10%Zn, ЛЖМц 59-1-1 та Л 69), залежність коефіцієнта теплоємності від температури яких апроксимується поліномом другого порядку та титанових сплавів (ВТ 1, ВТ 6 та ВТ 14), залежність коефіцієнта теплоємності від температури яких апроксимується поліномом п'ятого порядку.

4. За результатами кореляційної аналізи, встановлено, що між коефіцієнтом теплоємності та радіусом атомів за температур 100, 200, 273, 298 і 700 К немає лінійного зв'язку, а між коефіцієнтом теплоємності і порядковим номером металу за цих же температур є лінійний зв'язок. Подано оцінку ступенів лінійності та нелінійності. Узагальнено залежність коефіцієнта теплоємності від порядкового номеру та коефіцієнта теплоємності від радіусу атома для 40 металів та інтервалу температур 100-700 К.

Література

1. Лариков Л.Н. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник: Тепловые свойства металлов и сплавов / Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. – Киев: Наукова думка, 1985. – 438 с.
2. Гомонай В.І. Фізична та колоїдна хімія. Підручник. – Вінниця: Нова книга, 2007. – 496 с.
3. Горшков В.И. Основы физической химии / Горшков В.И., Кузнецов И.А. – Москва: Изд-во МГУ, 1993. – 335 с.
4. Даниэльс Ф. Физическая химия / Даниэльс Ф., Олберти Р. – Москва: Мир, 1978. – 647 с.
5. Жуховицкий А.А. Краткий курс физической химии / Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. – Москва: Металлургия, 1979. – 368 с.
6. Зимон А.Д. Физическая химия: Учебник / Зимон А.Д., Лещенко Н.Ф. – Москва: Химия, 2000. – 320 с.
7. Каданер Л.І. Фізична і колоїдна хемія. – Київ: Вища шк., 1983. – 288 с.
8. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. – Москва: Химия, 1975. – 584 с.
9. Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – Москва: Химия, 1978. – 624 с.
10. Физическая химия / Кнорре Д.Г., Крылова Л.Ф., Музыкантов В.С. – Москва: Высш. шк., 1981. – 328 с.
11. Кононський О.І. Фізична і колоїдна хімія: Підручник. – Київ: Центр учбової л-ри, 2009. – 312 с.
12. Краснов К.С. Физическая химия. – Москва: Высш. шк., 1995. – 512 с. (Ч 1); – 332 с. (Ч 2).
13. Физическая и коллоидная химия / Красовский И.В., Вайль Е.И., Безуглый В.Д. – Киев: Вища шк., 1983. – 296 с.
14. Лебідь В.І. Фізична хімія: Підручник. – Харків: Фоліо, 2005. – 480 с.
15. Ліпатніков В.Є. Фізична і колоїдна хімія / Ліпатніков В.Є., Козаков К.М. – Київ: Вища шк., 1983. – 198 с.
16. Лукьянов А.Б. Физическая и коллоидная химия. – Москва: Химия, 1988. – 288 с.
17. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. – Москва: Металлургия, 1989. – 503 с.
18. Мороз А.С. Фізична та колоїдна хімія / Мороз А.С., Ковальова А.Г. – Львів: Світ, 1994. – 278 с.
19. Полторак О.М. Термодинамика в физической химии. – Москва: Высш. шк., 1991. – 320 с.
20. Свідзинський А.В. Лекції з термодинаміки: Навч. посібник. – Луцьк: Вежа, 1999. – 83 с.
21. Семиохин И.А. Физическая химия. – Москва: Изд-во МГУ, 2001. – 272 с.
22. Стромберг А.Г. Физическая химия: Учебник / Стромберг А.Г., Семченко Д.П. – Москва: Высш. шк., 1999. – 528 с.

23. **Стромберг А.Г.** Физическая химия / Стромберг А.Г., Семченко Д.П. – Москва: Высш. шк., 1988. – 496 с.
24. **Физическая химия.** В 2-х кн. / Краснов К.С., Воробьев Н.К., Годнев И.Н. и др. – Москва: Высш. шк., 2001. – 319 с.
25. **Кабачний В.І.** Фізична і колоїдна хімія / Кабачний В.І., Осіпенко Л.К., Грицан Л.Д. та ін. – Харків: Прапор, вид-во Укр.ФА. 1999. – 368 с.
26. **Фролов Ю.Г.** Физическая химия / Фролов Ю.Г., Белик В.В. – Москва: Химия, 1993. – 464 с.
27. **Цветкова Л.Б.** Фізична хімія: Теорія і задачі: Навч. посіб. – Львів: Магнолія-2006, 2008. – 415 с.
28. **Эткинс П.** Физическая химия. В 2-х томах. – Москва: Мир, 1980. – 582 с. – Т. 1. – 584 с. – Т. 2.
29. **Адлер Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – Москва: Наука, 1976. – 280 с.
30. **Степнов М.Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний. – Москва: Машиностроение, 1972. – 232 с.
31. **Мюллер П.** Таблицы по математической статистике / Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. – Москва: Финансы и статистика, 1982. – 272 с.
32. **Краткий справочник физико-химических величин** / Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. – Ленинград: Химия, 1983. – 232 с.

Базюк Лілія Володимирівна – викладач кафедри неорганічної та фізичної хемії.

Сіренко Геннадій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хемії.

Рецензент

Мідак Л.Я. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри неорганічної та фізичної хемії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.