

Л.В. Базюк, Г.О. Сіренко

## Теплофізичні властивості металів та стопів: 4. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури та радіусу атомів

<sup>1</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна  
Тел. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: [sirenkog@rambler.ru](mailto:sirenkog@rambler.ru)

За літературними даними вивчено, проаналізовано методами кореляційної та регресійної аналізи та обґрунтовані залежності лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури, порядкового номера та радіусу атома металів. Показано, що зі збільшенням температури для більшості металів та стопів лінійний коефіцієнт теплового розширення зростає. Встановлено, що між коефіцієнтом лінійного розширення та радіусом атомів за температур 100, 200, і 300 К є лінійний зв'язок, за температури 800 К – немає лінійного зв'язку; між коефіцієнтом лінійного розширення і порядковим номером металу за температур 100, 200 і 800 К є лінійний зв'язок, за температури 300 К – лінійного зв'язку немає.

**Ключові слова:** метали, стопи, лінійний коефіцієнт теплового розширення, теплофізичні властивості, радіус атома металів, порядковий номер, кореляційна аналіза, регресійна аналіза.

*Стаття постуила до редакції 15.08.2011; прийнята до друку 15.03.2012.*

### Вступ

Відомо [1–28], що лінійний коефіцієнт теплового розширення ( $\alpha$ ) залежить від температури ( $T$ ), але відсутні: ретельний аналіз цієї залежності для металів та стопів, не приведені апроксимаційні функції, що описують ці залежності та не виявлений кореляційний зв'язок між лінійним коефіцієнтом теплового розширення та температурою, порядковим номером і радіусом атома первня Періодичної таблиці.

**Метою роботи** є дослідження залежності лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури, радіусу та порядкового номера атомів металів Періодичної системи первнів і стопів та пошуку кореляційних зв'язків і апроксимаційних математичних моделей між цими характеристиками

### I. Експериментальна частина

Для аналізу використані табличні дані [1]. Кореляційний та регресійний аналізи виконані за [29–31]. Вибірковий коефіцієнт кореляції зв'язку між  $y$  і  $x$  ( $r_p$ ) обчислювали за формулою [29,30].

Висували нульову гіпотезу рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції

$$H_0: \rho = 0$$
$$\uparrow$$
$$r_p \neq 0,$$

та альтернативну гіпотезу

$$H_1: \rho \neq 0$$
$$\uparrow$$
$$r_p \neq 0,$$

де вибірковий коефіцієнт кореляції ( $r_p$ ) був статистичною оцінкою генерального коефіцієнта кореляції ( $\rho$ ):

$$r_p \rightarrow \rho. \quad (3)$$

Перевірку  $H_0$  здійснювали для рівнів значущості  $\alpha = 0,05$  та  $\alpha = 0,01$  та ступенем вільностей  $f = N - 2$ , де  $N$  – кількість результатів [33, 34]:

1. За критичним значенням коефіцієнта кореляції  $r_{\text{ед}}$ , [31];

2. За критерієм Стьюдента  $t_T$ , [30];  
За перетворенням Фішера [30] та добутку  $(z_T \cdot S_Z)$ .

## II. Результати та обговорення

### 2.1. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення $\alpha$ металів від температури.

Головні коефіцієнти теплового розширення звичайно мають різну температурну залежність й можуть бути додатними та від'ємними. Знак перед коефіцієнтом залежить від анізотропії сил, що діють між атомами в кристалі. Крім того, чим більша енергія дисоціації металів (чим більша його температура топлення), тим менший лінійний коефіцієнт теплового розширення. За даними [1] побудовано температурні залежності металів відносно лінійного коефіцієнта теплового розширення  $\alpha$  [ $K^{-1}$ ].

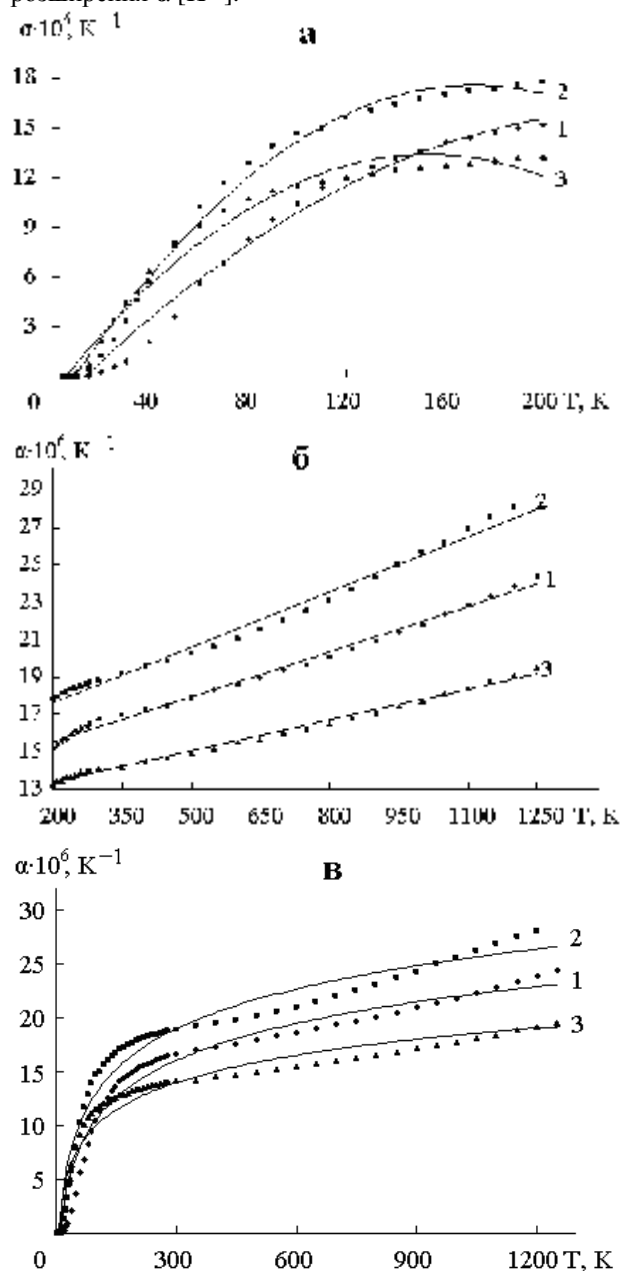


Рис.1. Залежність лінійного коефіцієнту теплового розширення металів від температури: 1 – міді ( $Z = 29$ ); 2 – срібла ( $Z = 47$ ); 3 – золота ( $Z = 79$ ).

1. На рис. 1 приведено залежність лінійного коефіцієнту теплового розширення  $\alpha$  металів побічної підгрупи I групи Періодичної системи первнів – міді, срібла та золота – від температури ( $T$ ) в інтервалі температур 0–200 K (рис.2а), в інтервалі температур 200–1250 K (рис.2б) та в інтервалі від 0 до 1250 K (рис.2в). Як видно з рис. 2а, лінійний коефіцієнт теплового розширення даних металів з підвищенням температури від  $\sim 0$  K до  $T = 100$  K інтенсивно зростає від  $\alpha = 0,008 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 10,45 \cdot 10^{-6}$  (для міді), від  $\alpha = 0,02 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 14,7 \cdot 10^{-6}$  (для срібла), від  $\alpha = 0,026 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$  (для золота). Подальше підвищення температури від 100 K до 200 K приводить до незначного зростання  $\alpha$ . Як видно з рис.2б, у всіх трьох випадках лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha$  лінійно зростає: від  $11,5 \cdot 10^{-6}$  до  $19,5 \cdot 10^{-6}$  для золота (крива 3), від  $\alpha = 10,45 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 24,4 \cdot 10^{-6}$  для міді (крива 1) та від  $\alpha = 14,7 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 28,1 \cdot 10^{-6}$  для срібла (крива 2) із збільшенням температури від 100 K до  $T = 1250$  K. Як видно з рис.2в, з підвищенням температури від  $\sim 0$  K до 100 K лінійний коефіцієнт теплового розширення Cu, Ag та Au інтенсивно зростає. В інтервалі високих температур спостерігається незначне зростання лінійного коефіцієнта теплового розширення з підвищенням температури у всіх трьох випадках. Залежність  $\alpha = f(T)$  описується логарифмічним рівнянням, при цьому коефіцієнт лінійного розширення не залежить від порядкового номеру первня.

Аналогічні залежності можна спостерігати для решти металів [1]. Так, лінійний коефіцієнт теплового розширення металів IA групи періодичної системи первнів літію та калію незначно збільшується від  $\alpha = 38,5 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 74 \cdot 10^{-6}$  (для натрію) та від  $\alpha = 63 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 83,3 \cdot 10^{-6}$  (для калію) із збільшенням температури від  $\sim 80$  K до  $\sim 400$  K.

Для кальцію спостерігається зростання коефіцієнта лінійного розширення від  $\alpha = 13,2 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 20,9 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 70 K до 200 K, в той час як для алюмінію значення лінійного коефіцієнту теплового розширення змінюються від  $\alpha = 0,05 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 20,2 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від  $\sim 0$  K до  $T = 200$  K. Із збільшенням температури від 200 K до 850 K для кальцію та алюмінію спостерігається майже однакове зростання коефіцієнта лінійного розширення від  $\alpha = 20,4 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 33,6 \cdot 10^{-6}$  (для кальцію) та від  $\alpha = 20,2 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 34,0 \cdot 10^{-6}$  (для алюмінію). Залежності коефіцієнта лінійного розширення кальцію та алюмінію від температури описуються поліномом другого порядку. З підвищенням температури від  $\sim 0$  K до  $\sim 200$  K лінійний коефіцієнт теплового розширення Ca та Al інтенсивно зростає. В інтервалі високих температур в обох випадках спостерігається незначне зростання лінійного коефіцієнта теплового розширення з підвищенням температури. Залежність  $\alpha = f(T)$  носить логарифмічний характер.

Зі збільшенням температури від 1 до 200 K коефіцієнт лінійного розширення титану інтенсивно зростає від  $\alpha = 0,0048 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 7,27 \cdot 10^{-6}$ . Подальше

підвищення температури від 200 до 1250 К приводить до незначного зростання лінійного коефіцієнта теплового розширення від  $\alpha = 7,27 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 12,0 \cdot 10^{-6}$ . Залежність коефіцієнта лінійного розширення титану від температури в інтервалі температур 0–200 К та 200–1250 К описується поліномом другого порядку, а температурна залежність  $\alpha$  титану в інтервалі температур 0–1250 К – поліномом шостого порядку.

Зі збільшенням температури від  $\sim 0$  до 100 К лінійний коефіцієнт теплового розширення ніобію та танталу інтенсивніше зростає: від  $\alpha = 0,003 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 4,77 \cdot 10^{-6}$  для ніобію та від  $\alpha = 0,0084 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 5,11 \cdot 10^{-6}$  для танталу, ніж лінійний коефіцієнт теплового розширення ванадію від  $\alpha = 0,0025 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 3,95 \cdot 10^{-6}$ . При подальшому підвищенні температури від 100 до 200 К спостерігається інтенсивніше зростання  $\alpha$  ванадію від  $\alpha = 3,95 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 7,49 \cdot 10^{-6}$ , ніж ніобію від  $\alpha = 4,77 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 6,39 \cdot 10^{-6}$  та танталу від  $\alpha = 5,11 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 6,17 \cdot 10^{-6}$ . Для танталу спостерігається зростання коефіцієнта лінійного розширення від  $\alpha = 6,17 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 8,87 \cdot 10^{-6}$ , для ніобію більш значне зростання від  $\alpha = 6,39 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 10,39 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до  $T \approx 2500$  К. Для ванадію  $\alpha$  різко зростає від  $\alpha = 7,49 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 14,2 \cdot 10^{-6}$  з підвищенням температури від 200 К до  $T = 1500$  К. При цьому лінійний коефіцієнт теплового розширення зі зростанням порядкового номеру первня зменшується. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення ванадію, ніобію і танталу від температури в інтервалі температур 0–200 К та 200–2500 К описується поліномом другого порядку. Температурна залежність  $\alpha$  ніобію та танталу в інтервалі температур 0–2500 К носить логарифмічний характер, а залежність  $\alpha = f(T)$  ванадію описується поліномом шостого порядку.

Із збільшенням температури від 1 К до  $T \approx 200$  К коефіцієнт лінійного розширення хрому, молібдену та вольфраму також інтенсивно зростає: хрому від  $\alpha = -0,05 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 5,14 \cdot 10^{-6}$ , молібдену від  $\alpha = 0,0043 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 4,60 \cdot 10^{-6}$ , вольфраму від  $\alpha = 0,000035 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 4,09 \cdot 10^{-6}$ . Для вольфраму спостерігається незначне зростання лінійного коефіцієнта теплового розширення від  $\alpha = 4,09 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 8,80 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до  $T = 3200$  К, для молібдену більш значне зростання від  $\alpha = 4,60 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 9,43 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до  $T = 2400$  К. Для хрому  $\alpha$  різко зростає від  $\alpha = 5,14 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 18,2 \cdot 10^{-6}$  з підвищенням температури від 200 К до  $T = 1900$  К. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення металів побічної підгрупи VI групи Періодичної системи первнів від температури в інтервалі температур 0–200 К та від 200 до 1900–3200 К описується поліномом другого порядку. Температурна залежність  $\alpha$  хрому, молібдену та вольфраму описується поліномом шостого порядку. Як і в попередній групі, з підвищенням температури лінійний коефіцієнт теплового розширення зростає, а із зростанням порядкового номера первня зменшується.

Лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha$ -мангану незначно зменшується від  $\alpha = -0,11 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = -0,90 \cdot 10^{-6}$  зі збільшенням температури від 4 К до 30 К. Подальше підвищення температури від 30 К до 200 К приводить до інтенсивного зростання лінійного коефіцієнту теплового розширення  $\alpha$ -мангану від  $\alpha = -0,90 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 19,00 \cdot 10^{-6}$ , тоді як для  $\beta$ -мангану спостерігається зростання лінійного коефіцієнта теплового розширення від  $\alpha = 14,80 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 21,60 \cdot 10^{-6}$  при підвищенні температури від 100 К до 200 К. Із збільшенням температури від  $T \approx 200$  до  $T \approx 800$ –1400 К лінійний коефіцієнт теплового розширення всіх модифікацій мангану значно зростає:  $\alpha$ -мангану від  $\alpha = 19,00 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 35,90 \cdot 10^{-6}$ ,  $\beta$ -мангану від  $\alpha = 21,60 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 48,20 \cdot 10^{-6}$ ,  $\gamma$ -мангану від  $\alpha = 12,30 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 45,20 \cdot 10^{-6}$ , а залежність  $\alpha = f(T)$  описується поліномом другого порядку. Найвищі значення лінійного коефіцієнта теплового розширення спостерігаються для  $\beta$ -мангану, а найнижчі – для  $\gamma$  мангану. Температурна залежність лінійного коефіцієнту теплового розширення  $\beta$ -мангану та  $\gamma$ -мангану добре описуються поліномом третього порядку, в той час як  $\alpha$ -мангану – поліномом четвертого порядку.

Із збільшенням температури від 3 К до  $T \approx 200$  К коефіцієнт лінійного розширення заліза, кобальту та ніколу інтенсивно зростає: заліза від  $\alpha = 0,011 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 9,98 \cdot 10^{-6}$ , кобальту від  $\alpha = 0,011 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 11,90 \cdot 10^{-6}$ , ніколу від  $\alpha = 0,06 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 11,40 \cdot 10^{-6}$ . Лінійний коефіцієнт теплового розширення всіх трьох металів незначно зростає: заліза від  $\alpha = 9,98 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 16,5 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до 800 К; кобальту від  $\alpha = 11,90 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 15,5 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до 650 К та ніколу від  $\alpha = 11,40 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 16,9 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до 600 К. Подальше підвищення температури приводить спочатку до незначного зменшення лінійного коефіцієнту теплового розширення всіх металів, а потім спостерігається незначне зростання  $\alpha$  при збільшенні температури до 800–1400 К. Температурна залежність  $\alpha$  заліза, кобальту та ніколу описується поліномом шостого порядку, при цьому лінійний коефіцієнт теплового розширення не залежить від порядкового номеру первня.

Лінійний коефіцієнт теплового розширення родію та паладію інтенсивно зростає: від  $\alpha = 3,20 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 7,57 \cdot 10^{-6}$  (для родію) із збільшенням температури від 70 К до 200 К та від  $\alpha = 1,12 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 10,84 \cdot 10^{-6}$  (для паладію) з підвищенням температури від 30 К до  $T = 200$  К. Із збільшенням температури від 200 К до  $T = 1100$  К лінійний коефіцієнт теплового розширення обох металів лінійно зростає: родію від  $\alpha = 7,57 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 12,40 \cdot 10^{-6}$  та паладію від  $\alpha = 10,84 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 17,40 \cdot 10^{-6}$ . Температурна залежність  $\alpha$  родію та паладію в інтервалі температур від 30–70 К до 1100 К носить логарифмічний характер. Лінійний коефіцієнт теплового розширення родію та паладію зростає з підвищенням температури, і знижується зі зростанням порядкового номеру.

Лінійний коефіцієнт теплового розширення іридію поступово зростає: від  $\alpha = 0,6 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 6,09 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 25 К до 200 К та незначно зростає від  $\alpha = 6,34 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 8,55 \cdot 10^{-6}$  для платини з підвищенням температури від 90 К до  $T = 200$  К. Лінійний коефіцієнт теплового розширення іридію незначно зростає від  $\alpha = 6,09 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 8,72 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до  $T = 1100$  К та  $\alpha$  платини інтенсивніше зростає від  $\alpha = 8,55 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 15,60 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 200 К до  $T = 2100$  К. Температурна залежність  $\alpha$  іридію та платини в інтервалі температур від 25–90 К до 1100–2100 К описується поліномом шостого порядку. Як і в попередньому випадку лінійний коефіцієнт теплового розширення іридію та платини зростає з підвищенням температури, і знижується зі зростанням порядкового номеру.

## 2.2. Температурна залежність коефіцієнтів теплового розширення металів, виміряних паралельно ( $\alpha_{\parallel}$ ) та перпендикулярно ( $\alpha_{\perp}$ ) до головної осі кристалу.

Під час дослідження монокристалів низької симетрії, для отримання повної характеристики теплового розширення, необхідно враховувати всі компоненти тензора теплового розширення (кількість незалежних тензорів залежить від кристалографічної симетрії кристалу) та провести відповідні виміри. Під час дослідження полікристалів отримуємо усереднений за кристалографічними напрямками лінійний коефіцієнт теплового розширення, який пов'язаний з компонентами тензора: для кубічної сингонії:

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha; \quad (4)$$

для гексагональної, тригональної та тетрагональної сингоній:

$$\alpha_{\text{сб}} = \frac{1}{3}(\alpha_{\parallel} + 2\alpha_{\perp}), \quad (5)$$

де  $\alpha_{\parallel}$ ,  $\alpha_{\perp}$  – коефіцієнти теплового розширення, виміряні паралельно та перпендикулярно до головної осі кристалу;

для ромбічної сингонії:

$$\alpha_{\text{сб}} = \frac{1}{3}(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3), \quad (6)$$

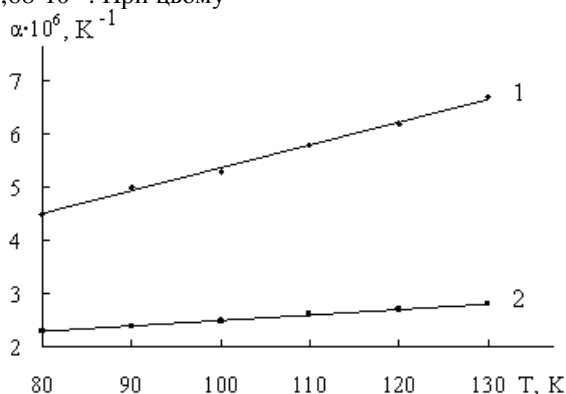
де  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – коефіцієнти розширення, виміряні паралельно до осей другого порядку. Об'ємний коефіцієнт теплового розширення  $\beta$  для всіх сингоній пов'язаний із середнім коефіцієнтом лінійного розширення так:

$$b = 3\alpha_{\text{сб}}. \quad (7)$$

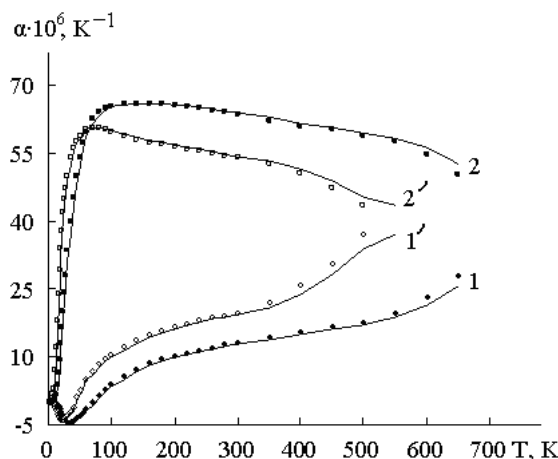
Досліджували також температурну залежність коефіцієнтів теплового розширення металів, виміряних паралельно ( $\alpha_{\parallel}$ ) та перпендикулярно ( $\alpha_{\perp}$ ) до головної осі кристалу.

**1. На рис. 2** приведено залежності лінійного коефіцієнту теплового розширення  $\alpha_{\perp}$  та  $\alpha_{\parallel}$  літію від температури ( $T$ ). Як видно з рис. 2, з підвищенням температури від 80 К до 130 К лінійний коефіцієнт теплового розширення літію, виміряний перпендикулярно до головної осі кристалу ( $\alpha_{\perp}$ ), зростає інтенсивніше від  $\alpha = 5,84 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha =$

$8,18 \cdot 10^{-6}$ , ніж лінійний коефіцієнт теплового розширення літію, виміряний паралельно до головної осі кристалу ( $\alpha_{\parallel}$ ), який із зростанням температури від 80 К до 130 К зростає від  $\alpha = 3,97 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 5,68 \cdot 10^{-6}$ . При цьому



**Рис. 2.** Залежність лінійного коефіцієнту теплового розширення літію від температури, виміряного: 1 – перпендикулярно ( $\alpha_{\perp}$ ) до головної осі кристалу; 2 – паралельно ( $\alpha_{\parallel}$ ) до головної осі кристалу.



**Рис. 3.** Залежність лінійного коефіцієнту теплового розширення цинку (1,2) та кадмію (1',2') від температури, виміряного:

1,1' – перпендикулярно ( $\alpha_{\perp}$ ) до головної осі кристалу;

2,2' – паралельно ( $\alpha_{\parallel}$ ) до головної осі кристалу.

значення для  $\alpha_{\parallel}$  нижчі, ніж для  $\alpha_{\perp}$ , а залежність  $\alpha \sim f(T)$  носить лінійний характер.

Аналогічна залежність лінійного коефіцієнту теплового розширення  $\alpha_{\perp}$  та  $\alpha_{\parallel}$  від температури ( $T$ ) спостерігається для берилію. Зі збільшенням температури від 80 К до 1200 К лінійний коефіцієнт теплового розширення берилію, виміряний перпендикулярно до головної осі кристалу ( $\alpha_{\perp}$ ), зростає інтенсивніше від  $\alpha = 0,70 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 23,40 \cdot 10^{-6}$ , ніж лінійний коефіцієнт теплового розширення берилію, виміряний паралельно до головної осі кристалу ( $\alpha_{\parallel}$ ), який із зростанням температури від 80 К до 1200 К зростає від  $\alpha = 0,17 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 19,5 \cdot 10^{-6}$ . Залежність  $\alpha \sim f(T)$  носить логарифмічний характер.

Значення  $\alpha_{\parallel}$  та  $\alpha_{\perp}$  магнію в інтервалі температур 5–40 К збільшуються майже однаково: від  $\alpha_{\perp} =$

$0,11 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 3,0 \cdot 10^{-6}$  та від  $\alpha_{\parallel} = 0,007 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 3,2 \cdot 10^{-6}$ . Зі збільшенням температури від 40 К до 280 К лінійний коефіцієнт теплового розширення магнію, виміряний паралельно до головної осі кристалу ( $\alpha_{\parallel}$ ), зростає інтенсивніше від  $\alpha = 3,20 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 26,80 \cdot 10^{-6}$ , ніж лінійний коефіцієнт теплового розширення магнію, виміряний перпендикулярно до головної осі кристалу ( $\alpha_{\perp}$ ), який із зростанням температури від 40 К до 280 К зростає від  $\alpha = 3,00 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 24,7 \cdot 10^{-6}$ . Залежності  $\alpha_{\parallel} \sim f(T)$  та  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  описуються поліномами шостого порядку.

**2. На рис. 3 приведено залежність лінійного коефіцієнту теплового розширення  $\alpha_{\perp}$  та  $\alpha_{\parallel}$  цинку та кадмію від температури (Т). Як видно з рис. 3, залежності  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  та  $\alpha_{\parallel} \sim f(T)$  суттєво відрізняються. Так, з підвищенням температури лінійний коефіцієнт теплового розширення, виміряний паралельно до головної осі кристалів ( $\alpha_{\parallel}$ ) цинку (крива 2) та кадмію (крива 2') інтенсивно зростає від  $\alpha = 0,03 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 66,0 \cdot 10^{-6}$  (для цинку) та від  $\alpha_{\parallel} = 0,02 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 60,60 \cdot 10^{-6}$  (для кадмію) із збільшенням температури від  $\sim 3$  К до температури піка максимального їх значення ( $T_{\max} = 140$  К для цинку та  $T_{\max} = 70$  К для кадмію). Після піку максимуму лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\parallel}$  незначно спадає від  $\alpha_{\parallel} = 66,0 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 50,3 \cdot 10^{-6}$  (для цинку) та від  $\alpha_{\parallel} = 60,60 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 43,40 \cdot 10^{-6}$  (для кадмію) під час збільшення температури від  $T_{\max}$  до 500–650 К. Лінійний коефіцієнт теплового розширення, виміряний перпендикулярно до головної осі кристалів ( $\alpha_{\perp}$ ) цинку (крива 1) та кадмію (крива 1') спочатку спадає від  $\alpha_{\perp} = 0,003 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = -4,5 \cdot 10^{-6}$  (для цинку) та від  $\alpha_{\perp} = 0,004 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = -3,90 \cdot 10^{-6}$  (для кадмію) із збільшенням температури від  $\sim 3$  К до температури піка мінімального їх значення ( $T_{\min} = 35$  К для цинку та  $T_{\min} = 22$  К для кадмію). Після піку мінімуму лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\perp}$  різко зростає від  $\alpha_{\perp} = -4,5 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 27,9 \cdot 10^{-6}$  (для цинку) та від  $\alpha_{\perp} = -3,90 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 37,0 \cdot 10^{-6}$  (для кадмію) під час збільшення температури від  $T_{\min}$  до 500–650 К. Температурні залежності  $\alpha_{\perp}$  та  $\alpha_{\parallel}$  цинку та кадмію в інтервалі температур від 3 К до 500–650 К описуються поліномами шостого порядку. Лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\perp}$  скандію значно зростає від  $\alpha_{\perp} = 7,61 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 12,1 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 300 К до 1250 К, в той час як лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\parallel}$  скандію із збільшенням температури від 300 до 1250 К майже не змінюється від  $\alpha_{\parallel} = 15,1 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 17,7 \cdot 10^{-6}$ . Для ітрію спостерігається зростання  $\alpha_{\perp}$  від  $\alpha_{\perp} = 0,1 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 4,3 \cdot 10^{-6}$  та різке зростання  $\alpha_{\parallel}$  від  $\alpha_{\parallel} = 0,1 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 18,4 \cdot 10^{-6}$  із зростанням температури від  $\sim 10$  К до 200 К. В інтервалі температур 200–1050 К  $\alpha_{\perp}$  та  $\alpha_{\parallel}$  із збільшенням температури змінюються незначно. Для обох металів значення  $\alpha_{\perp}$  значно нижчі, ніж для та  $\alpha_{\parallel}$ .**

Зі збільшенням температури від 4 К до 500 К лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\parallel}$   $\beta$ -олова, зростає інтенсивніше від  $\alpha_{\parallel} = 0,08 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 41,40 \cdot 10^{-6}$ , ніж лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\perp}$   $\beta$ -олова, який із збільшенням

температури від 4 К до 500 К зростає від  $\alpha_{\perp} = -0,01 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 20,3 \cdot 10^{-6}$ . Отже, значення  $\alpha_{\perp}$   $\beta$ -олова нижчі, ніж значення  $\alpha_{\parallel}$  цього ж металу, а залежності  $\alpha_{\parallel} \sim f(T)$  та  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  описуються поліномами шостого порядку.

Зі збільшенням температури від 3 К до 50 К лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\parallel}$  бісмуту, зростає інтенсивніше від  $\alpha_{\parallel} = 0,054 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 16,0 \cdot 10^{-6}$ , ніж лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha_{\perp}$  бісмуту, який із збільшенням температури від 3 К до 80 К зростає від  $\alpha_{\perp} = 0,01 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 9,16 \cdot 10^{-6}$ . В інтервалі температур від 50–80 К до 500 К  $\alpha_{\perp}$  та  $\alpha_{\parallel}$  змінюються незначно: від  $\alpha_{\perp} = 16,0 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 17,50 \cdot 10^{-6}$  та від  $\alpha_{\parallel} = 9,16 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 11,90 \cdot 10^{-6}$ . Як і в попередньому випадку значення  $\alpha_{\perp}$  нижчі, ніж значення  $\alpha_{\parallel}$  цього ж металу, а залежності  $\alpha_{\parallel} \sim f(T)$  та  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  носять поліноміальний характер.

Зі збільшенням температури від 140 К до 2400 К  $\alpha_{\parallel}$  та  $\alpha_{\perp}$  рутенію різко зростають: від  $\alpha_{\perp} = 4,60 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 15,72 \cdot 10^{-6}$  та від  $\alpha_{\parallel} = 5,50 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 20,99 \cdot 10^{-6}$ . Лінійні коефіцієнти теплового розширення  $\alpha_{\parallel}$  та  $\alpha_{\perp}$  осмію незначно зростають: від  $\alpha_{\perp} = 3,97 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\perp} = 5,68 \cdot 10^{-6}$  та від  $\alpha_{\parallel} = 5,84 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha_{\parallel} = 8,18 \cdot 10^{-6}$  із збільшенням температури від 300 К до  $T = 800$  К. Для обох металів значення  $\alpha_{\perp}$  нижчі, ніж значення  $\alpha_{\parallel}$ , а залежності  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  та  $\alpha_{\parallel} \sim f(T)$  описуються поліномами другого порядку

### 2.3. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення стопів від температури.

За даними [1] побудовано температурні залежності стопів відносно коефіцієнта лінійного розширення.

**1. На рис. 4 приведено залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення ( $\alpha$ ) стопів алюмінію з різними наповнювачами від температури (Т). Як видно з рис. 4, зі зростанням температури від  $\sim 225$  К до  $T = 700$  К коефіцієнт лінійного розширення стопів алюмінію лінійно зростає. Найвищі його значення спостерігаються у стопу Al + 5%Mg, а найнижчими значеннями  $\alpha$  володіє стоп Al + 2%Mo.**

**2. На рис. 5 приведено залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення ( $\alpha$ ) стопів титану: Ti + 20%Zr, Ti + 50%Zr, Ti + 2%Mo від температури (Т). Як видно з рис. 5, лінійний коефіцієнт теплового розширення усіх стопів титану зростає зі збільшенням температури. Найвищі його значення спостерігаються у стопу Ti + 2%Mo, а найнижчі – у стопу Ti + 50%Zr у всьому інтервалі температур. Залежність  $\alpha \sim f(T)$  описується поліномом другого порядку.**

Аналогічні залежності можна спостерігати для решти стопів [1]. Так, із збільшенням температури від 293 К до  $T \approx 2000$  К коефіцієнт лінійного розширення стопу Hf + 2%Zr зростає інтенсивніше від  $\alpha = 7,9 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$ , ніж лінійний коефіцієнт теплового розширення стопів цирконію: від  $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 7,8 \cdot 10^{-6}$  для стопу Zr + 6-12%Ti та від  $\alpha = 6,8 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 7,9 \cdot 10^{-6}$  для стопу Zr + 25%Ti зі збільшенням температури від 293 К до 1000 К. Як і

в попередньому випадку, залежність  $\alpha \sim f(T)$  описується поліномом другого порядку.

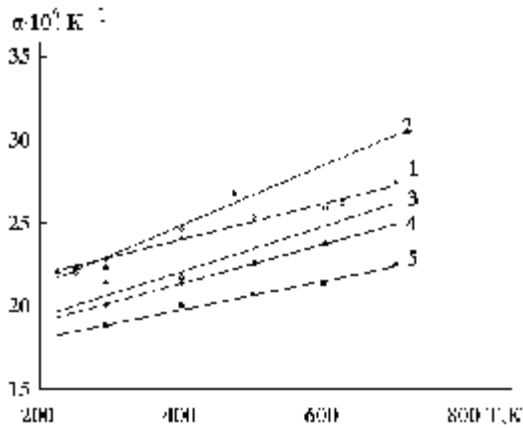


Рис. 4. Температурні залежності лінійного коефіцієнта теплового розширення алюмінієвих сплавів: 1 – Al + 4% Cu; 2 – Al + 5% Mg; 3 – Al + 1,5% Zr; 4 – Al + 10% Si; 5 – Al + 2% Mo.

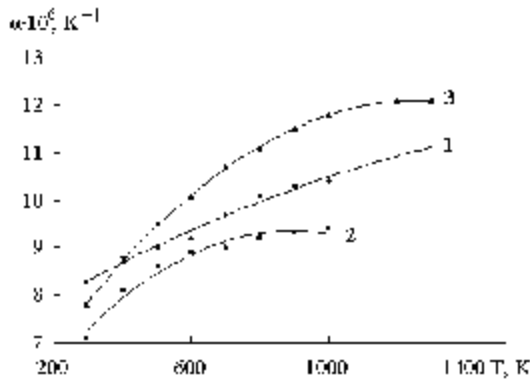


Рис. 5. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення титанових сплавів від температури: 1 – Ti + 20% Zr; 2 – Ti + 50% Zr; 3 – Ti + 2% Mo.

Лінійний коефіцієнт теплового розширення обох сплавів ванадію незначно зростає зі збільшенням температури. Вищі його значення характерні для сплаву V + 20% Ti. Залежність  $\alpha \sim f(T)$  сплаву V + 20% Ti описується поліномом другого порядку, а залежність  $\alpha \sim f(T)$  сплаву V + 40% Mo – поліномом третього порядку.

Лінійний коефіцієнт теплового розширення усіх сплавів ніобію зростає зі збільшенням температури. Найвищі його значення спостерігаються у сплаву Nb + 20% U, а найнижчі – у сплаву Nb + 20% Mo у всьому інтервалі температур. Залежність  $\alpha \sim f(T)$  описується поліномом другого порядку.

Лінійний коефіцієнт теплового розширення усіх сплавів молібдену (Mo + 20% Nb, Mo + 50% Nb, Mo + 10% V, Mo + 20% V) незначно зростає зі збільшенням температури. Вищі його значення характерні для сплаву Mo + 50% Nb. Чим вищий вміст наповнювача, тим вищі значення  $\alpha$ . Залежність  $\alpha \sim f(T)$  для даних сплавів молібдену описується поліномом другого порядку. Лінійний коефіцієнт теплового розширення сплавів молібдену (Mo + 0,5% Ta, Mo + 50% Re, Mo +

30% W) різко зростає зі збільшенням температури, а залежність  $\alpha \sim f(T)$  носить лінійний характер.

Зі збільшенням температури лінійний коефіцієнт теплового розширення ( $\alpha$ ) мартенситних, мартенситно-феритних і феритних криць (сталей) марки: X5M, 4X13, 2X1213МБФР, 1X12В2МФ зростає, а залежність  $\alpha \sim f(T)$  носить нелінійний характер. Найвищі його значення спостерігаються у сталі X5M в інтервалі температур 600–1400 К.

Зі зростанням температури лінійний коефіцієнт теплового розширення ( $\alpha$ ) нержавіючих, жаростійких та жароміцних криць (сталей) марки: 1X18Н9ТЗ, 0X18Н12Б, X18Н10Т, X23Н18, X17Н13М2Т, ХН35ВТ, X16Н25М6, Х22Н26 збільшується, а залежність  $\alpha \sim f(T)$  носить нелінійний характер.

Лінійний коефіцієнт теплового розширення ( $\alpha$ ) аустенітних сталей марки: 12X18Н9Т та 12X18Н10Т з підвищенням температури від 20–80 К до  $T = 300$  К інтенсивно зростає від  $\alpha = 0,8 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 16,2 \cdot 10^{-6}$  (для сталі 12X18Н9Т) та від  $\alpha = 6,5 \cdot 10^{-6}$  до  $\alpha = 16,7 \cdot 10^{-6}$  (для сталі 12X18Н10Т). Як і в попередніх випадках, залежність  $\alpha \sim f(T)$  описується поліномом другого порядку

#### 2.4. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури (регресійна аналіза).

Шукали апроксимацію  $\alpha \sim f(T)$ ,  $\alpha_{II} \sim f(T)$  та  $\alpha_{L} \sim f(T)$  у вигляді поліному першого ( $y = ax + b$ ), другого ( $y = ax^2 + bx + c$ ), третього ( $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ) та шостого порядків ( $y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + h$ ) та у вигляді  $y = a \ln(x) + b$ , де  $y = \alpha$ ,  $\alpha_{II}$ ,  $\alpha_{L}$ ,  $x = T$ . Ступінь адекватності поліномів експериментальним даним оцінювали за коефіцієнтом апроксимації  $R^2$ :

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{aa}}{SS_{\{y\}}}, \quad (8)$$

де  $SS_{aa}$  – сума квадратів під час розрахунку дисперсії адекватності;

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

$$0 \leq R^2 \leq 1. \quad (9)$$

Результати регресійної аналізи зведено у табл. 1 для металів та у табл. 2 для сплавів. Як видно з табл. 1, у всіх металів для залежностей  $\alpha \sim f(T)$ ,  $\alpha_{II} \sim f(T)$  та  $\alpha_{L} \sim f(T)$  існує надійний зв'язок при апроксимації як поліномом другого порядку, так і поліномом шостого порядку, а також логарифмічною функцією (окрім  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -мангану, залежність  $\alpha \sim f(T)$  яких апроксимується поліномом четвертого і третього порядку та літію і скандію, залежність  $\alpha_{II} \sim f(T)$  та  $\alpha_{L} \sim f(T)$  яких носить лінійний характер).

Як видно з табл. 2, у більшості сплавів для залежностей  $\alpha \sim f(T)$  існує надійний зв'язок при апроксимації як поліномом першого порядку, так і поліномом другого порядку (окрім, сплаву ванадію V + 40% Mo залежність  $\alpha \sim f(T)$  якого апроксимується поліномом третього порядку).

Таблиця 1

Поліноміальна та логарифмічна моделі залежності лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури

|                 | Метали   | Рівняння апроксимації  | R <sup>2</sup> |
|-----------------|--|--|----------------|
| α               | Натрій   | $y = -0,0005x^2 + 0,3517x + 16,133$  | 0,9865         |
|                 | Калій  | $y = 0,0008x^2 - 0,219x + 77,198$  | 0,9822         |
|                 | Мідь   | $y = 4,9662 \ln(x) - 12,301$   | 0,9604         |
|                 | Срібло   | $y = 5,3629 \ln(x) - 11,653$   | 0,9677         |
|                 | Золото   | $y = 3,6279 \ln(x) - 6,7154$   | 0,9694         |
|                 | Кальцій  | $y = 6,6744 \ln(x) - 14,723$   | 0,9551         |
|                 | Алюміній   | $y = 8,7491 \ln(x) - 27,303$   | 0,9657         |
|                 | Титан  | $y = 9 \cdot 10^{-17}x^6 - 3 \cdot 10^{-13}x^5 + 3 \cdot 10^{-10}x^4 - 5 \cdot 10^{-9}x^3 - 0,0001x^2 + 0,06x - 0,5503$              | 0,9952         |
|                 | Цирконій   | $y = -3 \cdot 10^{-16}x^6 + 1 \cdot 10^{-12}x^5 - 2 \cdot 10^{-9}x^4 + 1 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,0005x^2 + 0,0955x - 1,3919$            | 0,9535         |
|                 | Ванадій  | $y = 8 \cdot 10^{-18}x^6 - 6 \cdot 10^{-15}x^5 - 7 \cdot 10^{-11}x^4 + 2 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0002x^2 + 0,065x - 0,942$              | 0,9918         |
|                 | Ніобій   | $y = 1,915 \ln(x) - 4,4421$  | 0,9679         |
|                 | Тантал   | $y = 1,4681 \ln(x) - 2,42$   | 0,9242         |
|                 | Хром   | $y = 2 \cdot 10^{-19}x^6 + 1 \cdot 10^{-17}x^5 - 9 \cdot 10^{-12}x^4 + 4 \cdot 10^{-8}x^3 - 5 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0377x - 0,9223$   | 0,9937         |
|                 | Молібден   | $y = -3 \cdot 10^{-18}x^6 + 2 \cdot 10^{-14}x^5 - 7 \cdot 10^{-11}x^4 + 1 \cdot 10^{-7}x^3 - 9 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0387x - 0,4107$  | 0,9947         |
|                 | Вольфрам   | $y = -8 \cdot 10^{-19}x^6 + 8 \cdot 10^{-15}x^5 - 3 \cdot 10^{-11}x^4 + 7 \cdot 10^{-8}x^3 - 7 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0322x - 0,2501$  | 0,9939         |
|                 | α-манган   | $y = 1 \cdot 10^{-10}x^4 - 2 \cdot 10^{-8}x^3 - 0,0002x^2 + 0,1343x - 2,5539$  | 0,9765         |
|                 | β-манган   | $y = 3 \cdot 10^{-8}x^3 - 7 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0762x + 8,802$  | 0,9978         |
|                 | γ-манган   | $y = 7 \cdot 10^{-8}x^3 - 0,0001x^2 + 0,084x + 0,4913$   | 1              |
|                 | Залізо   | $y = -3 \cdot 10^{-18}x^6 - 3 \cdot 10^{-15}x^5 + 2 \cdot 10^{-11}x^4 + 1 \cdot 10^{-8}x^3 - 8 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0649x - 0,90142$ | 0,9843         |
|                 | Кобальт  | $y = -5 \cdot 10^{-17}x^6 + 3 \cdot 10^{-13}x^5 - 6 \cdot 10^{-10}x^4 + 6 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0004x^2 + 0,1221x - 1,6423$           | 0,9838         |
| Нікол           | $y = -8 \cdot 10^{-17}x^6 + 4 \cdot 10^{-13}x^5 - 9 \cdot 10^{-10}x^4 + 9 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0005x^2 + 0,1413x - 3,6031$ | 0,9966   |                |
| Родій           | $y = 2,7981 \ln(x) - 7,6775$   | 0,9748   |                |
| Паладій         | $y = 4,0993 \ln(x) - 11,642$   | 0,9737   |                |
| Иридій          | $y = -1 \cdot 10^{-16}x^6 + 5 \cdot 10^{-17}x^5 - 9 \cdot 10^{-10}x^4 + 8 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0004x^2 + 0,0866x - 1,4462$ | 0,999  |                |
| Платина         | $y = -5 \cdot 10^{-18}x^6 + 4 \cdot 10^{-14}x^5 - 1 \cdot 10^{-10}x^4 + 1 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0001x^2 + 0,0372x + 4,177$  | 0,9965   |                |
| α <sub>II</sub> | Літій  | $y = 0,01x + 1,5$  | 1              |
|                 | Берилій  | $y = 7,5391 \ln(x) - 34,297$   | 0,9951         |
|                 | Магній   | $y = 2 \cdot 10^{-12}x^6 - 2 \cdot 10^{-9}x^5 + 7 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,0001x^3 + 0,0118x^2 - 0,2405x + 1,2259$                       | 0,9997         |
|                 | Цинк   | $y = -1 \cdot 10^{-13}x^6 + 2 \cdot 10^{-10}x^5 - 2 \cdot 10^{-7}x^4 + 8 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0191x^2 + 2,0821x - 16,082$            | 0,9826         |
|                 | Кадмій   | $y = -8 \cdot 10^{-13}x^6 + 1 \cdot 10^{-9}x^5 - 9 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,0003x^3 - 0,0427x^2 + 3,0407x - 13,976$                      | 0,9793         |
|                 | Скандій  | $y = 5 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0048x + 16,255$  | 0,9945         |
|                 | Ітрій  | $y = -6 \cdot 10^{-16}x^6 + 2 \cdot 10^{-12}x^5 - 4 \cdot 10^{-9}x^4 + 3 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,0013x^2 + 0,2719x - 3,9732$            | 0,9964         |
|                 | β-олово  | $y = -1 \cdot 10^{-13}x^6 + 2 \cdot 10^{-10}x^5 - 1 \cdot 10^{-7}x^4 + 4 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,008x^2 + 0,746x - 3,8324$              | 0,9964         |
|                 | Бісмут   | $y = -2 \cdot 10^{-13}x^6 + 3 \cdot 10^{-10}x^5 - 2 \cdot 10^{-7}x^4 + 6 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0099x^2 + 0,7396x - 2,9723$            | 0,9854         |
|                 | Рутеній  | $y = 6 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0046x + 6,6646$  | 0,9859         |
|                 | Осмій  | $y = 4 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0004x + 5,3745$  | 0,9999         |
| α <sub>I</sub>  | Літій  | $y = 0,0431x + 1,0533$   | 0,9966         |

|          |   |        |
|----------|---|--------|
| Берилій  | $y = 8,8702 \ln(x) - 39,077$  | 0,9926 |
| Магній   | $y = 2 \cdot 10^{-12}x^6 - 2 \cdot 10^{-9}x^5 + 7 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,0001x^3 + 0,0109x^2 - 0,219x + 1,1312$             | 0,9996 |
| Цинк     | $y = 5 \cdot 10^{-14}x^6 - 1 \cdot 10^{-10}x^5 + 7 \cdot 10^{-8}x^4 - 3 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0047x^2 - 0,2474x + 1,1032$  | 0,9883 |
| Кадмій   | $y = 3 \cdot 10^{-13}x^6 - 4 \cdot 10^{-10}x^5 + 2 \cdot 10^{-7}x^4 - 7 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0082x^2 - 0,2548x + 0,0805$  | 0,9879 |
| Скандій  | $y = 0,0048x + 6,1488$  | 0,9984 |
| Ітрій    | $y = -1 \cdot 10^{-16}x^6 + 5 \cdot 10^{-13}x^5 - 8 \cdot 10^{-10}x^4 + 6 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0003x^2 + 0,062x - 1,2769$ | 0,9947 |
| β-Станум | $y = 1 \cdot 10^{-13}x^6 - 2 \cdot 10^{-10}x^5 + 9 \cdot 10^{-8}x^4 - 2 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0022x^2 + 0,0572x - 1,04$    | 0,9933 |
| Бісмут   | $y = 3 \cdot 10^{-14}x^6 - 4 \cdot 10^{-11}x^5 + 1 \cdot 10^{-8}x^4 - 7 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0009x^2 + 0,1941x - 1,3505$  | 0,9922 |
| Рутеній  | $y = 9 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0024x + 4,6694$   | 0,998  |
| Осмій    | $y = 4 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0009x + 3,8934$   | 1      |

Таблиця 2

Математичні моделі залежностей лінійного коефіцієнта теплового розширення сплавів від температури

| Сплави       | Рівняння апроксимації  | R <sup>2</sup> |
|--------------|--|----------------|
| Al + 4%Cu    | $y = 0,0107x + 19,718$   | 0,9508         |
| Al + 5%Mg    | $y = 0,018x + 17,692$  | 0,8947         |
| Al + 1,5%Zr  | $y = 0,0136x + 16,635$   | 0,831          |
| Al + 10%Si   | $y = 0,0119x + 16,661$   | 0,9974         |
| Al + 2%Mo    | $y = 0,0086x + 16,379$   | 0,9857         |
| Ti + 20%Zr   | $y = -1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0043x + 7,1237$                     | 0,9827         |
| Ti + 50%Zr   | $y = -6 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0104x + 4,7277$                     | 0,9714         |
| Ti + 2%Mo    | $y = -5 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0116x + 4,8142$                     | 0,9998         |
| Hf + 2%Zr    | $y = -1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0053x + 6,3713$                     | 0,9973         |
| Zr + 6-12%Ti | $y = -6 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0109x + 2,7582$                     | 0,9964         |
| Zr + 25%Ti   | $y = -9 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0029x + 5,9463$                     | 0,9791         |
| V + 20%Ti    | $y = 2 \cdot 10^{-6}x^2 - 3 \cdot 10^{-5}x + 10,15$              | 0,9988         |
| V + 40%Mo    | $y = 9 \cdot 10^{-9}x^3 - 2 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0179x + 4,6881$ | 0,9874         |
| Nb + 20%U    | $y = -1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0039x + 6,8707$                     | 0,9848         |
| Nb + 1%Zr    | $y = -1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0037x + 6,0539$                     | 0,9981         |
| Nb + 20%Mo   | $y = -7 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0019x + 6,552$                      | 0,9839         |
| Mo + 20%Nb   | $y = 1 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0007x + 5,8039$                      | 0,8637         |
| Mo + 50%Nb   | $y = -8 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,002x + 6,6164$                      | 0,9179         |
| Mo + 10%V    | $y = -2 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0018x + 5,0313$                     | 0,9862         |
| Mo + 20%V    | $y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0049x + 5,3747$                     | 0,9474         |
| Mo + 30%W    | $y = 0,0021x + 3,9843$   | 0,9486         |



|             |  |        |
|-------------|--|--------|
| Mo + 0,5%Ta | $y = 0,0024x + 4,1958$                       | 0,9829 |
| Mo + 50%Re  | $y = 0,0019x + 5,0684$                       | 0,981  |
| X5M         | $y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0083x + 7,8971$ | 0,997  |
| 4X13        | $y = -1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,006x + 8,0542$  | 0,9968 |
| 12X1213МБФР | $y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0046x + 9,815$  | 0,9875 |
| 1X12B2MФ    | $y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,007x + 7,3652$  | 0,9976 |
| 1X18H9T3    | $y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0108x + 11,34$  | 0,9981 |
| 0X18H12Б    | $y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0058x + 14,602$ | 0,9965 |
| X18H10T     | $y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0055x + 14,753$ | 0,9896 |
| X23H18      | $y = 3 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0021x + 16,015$  | 0,9969 |
| X17H13M2T   | $y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0066x + 13,55$  | 0,9924 |
| XH35BT      | $y = 7 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0063x + 16,543$  | 0,9753 |
| X16H25M6    | $y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0054x + 13,342$ | 0,995  |
| X22H26      | $y = -1 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0056x + 11,895$ | 0,9997 |
| 12X18H9T    | $y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0055x + 14,753$ | 0,9896 |
| 12X18H10T   | $y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0108x + 11,34$  | 0,9981 |

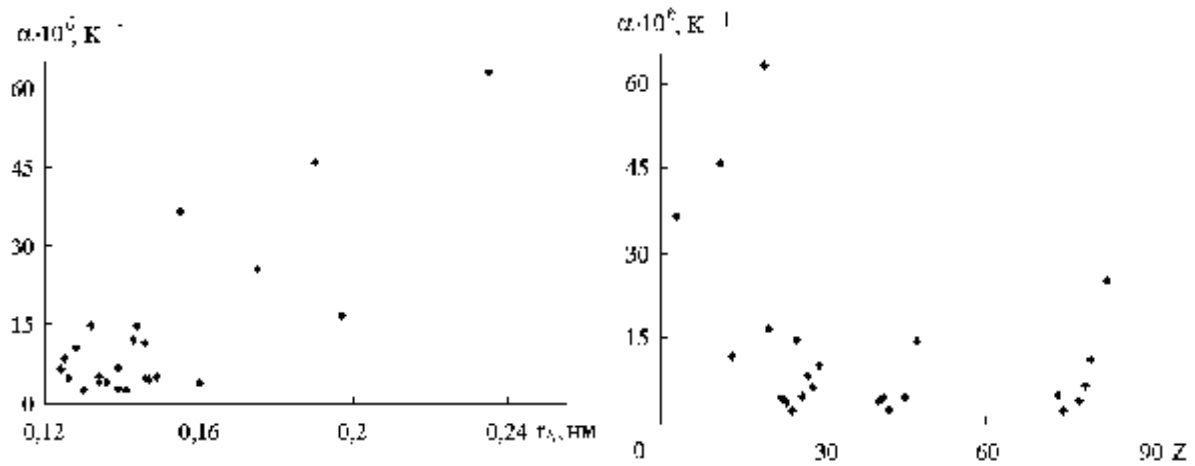


Рис. 6. Узагальнена залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 100 К.

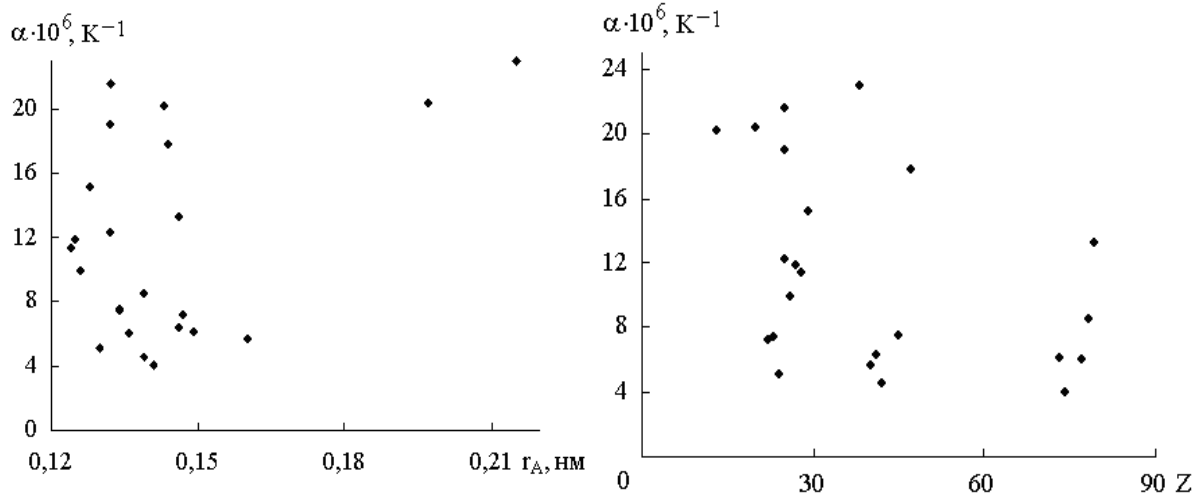


Рис. 7. Узагальнена залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 200 К.

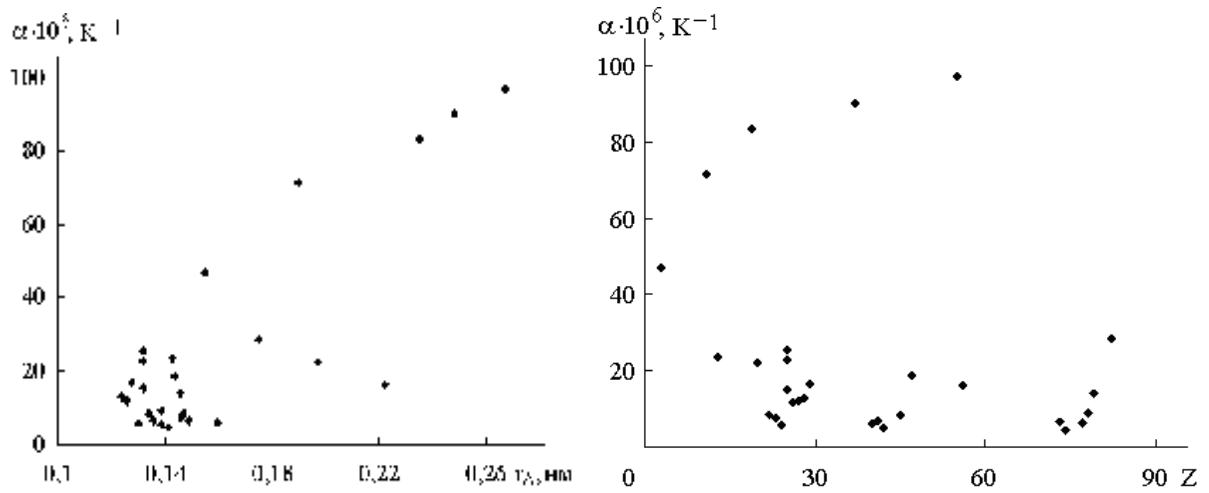


Рис. 8. Узагальнена залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 300 К.

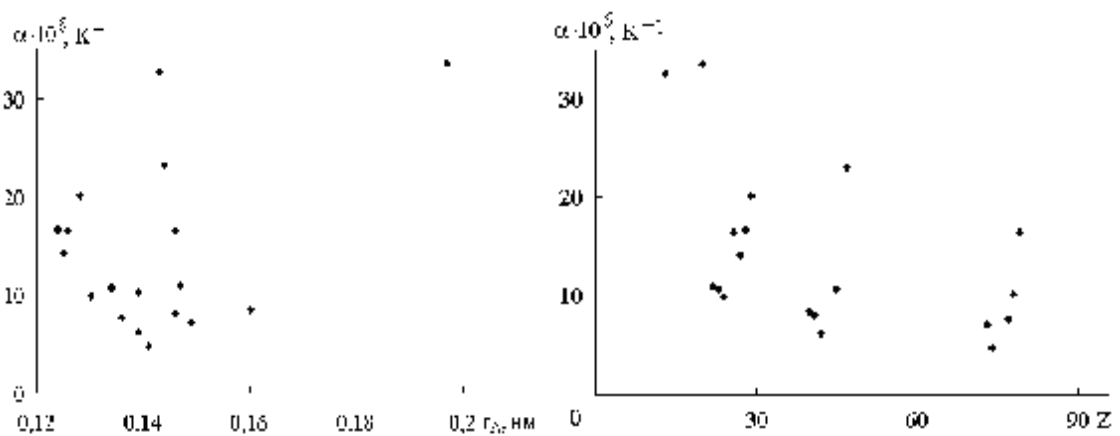


Рис. 9. Узагальнена залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 800 К.

Таблиця 3

Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення металів та сплавів від температури, радіусу атомів та порядкового номера в Періодичній системі первнів

| Метал        | Порядковий номер Z | Радіус атома $r_A$ , нм | $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$ |       |       |       |
|--------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|              |                    |                         | 100 К                       | 200 К | 300 К | 800 К |
| Li           | 3                  | 0,155                   | 36,4                        | 43,1  | 47,1  | –     |
| Na           | 11                 | 0,190                   | 45,7                        | 64,7  | 71,5  | –     |
| K            | 19                 | 0,235                   | 63                          | 66    | 83,3  | –     |
| Rb           | 37                 | 0,248                   | –                           | –     | 90    | –     |
| Cs           | 55                 | 0,267                   | –                           | –     | 97    | –     |
| Cu           | 29                 | 0,128                   | 10,45                       | 15,2  | 16,7  | 20,1  |
| Ag           | 47                 | 0,144                   | 14,7                        | 17,8  | 18,8  | 23,1  |
| Au           | 79                 | 0,146                   | 11,5                        | 13,3  | 14,1  | 16,5  |
| Ca           | 20                 | 0,197                   | 16,8                        | 20,4  | 22,4  | 33,6  |
| Sr           | 38                 | 0,215                   | –                           | 23    | –     | –     |
| Ba           | 56                 | 0,222                   | –                           | –     | 16,4  | –     |
| Al           | 13                 | 0,143                   | 12,05                       | 20,2  | 23,8  | 32,6  |
| Ti           | 22                 | 0,147                   | 4,54                        | 7,27  | 8,40  | 10,96 |
| Zr           | 40                 | 0,160                   | 4,09                        | 5,72  | 6,18  | 8,52  |
| Pb           | 82                 | 0,175                   | 25,4                        | 27,3  | 28,5  | –     |
| V            | 23                 | 0,134                   | 3,95                        | 7,49  | 7,84  | 10,7  |
| Nb           | 41                 | 0,146                   | 4,77                        | 6,39  | 7,07  | 8,09  |
| Ta           | 73                 | 0,149                   | 5,11                        | 6,17  | 6,60  | 7,12  |
| Cr           | 24                 | 0,130                   | 2,42                        | 5,14  | 5,90  | 9,90  |
| Mo           | 42                 | 0,139                   | 2,72                        | 4,60  | 5,23  | 6,20  |
| W            | 74                 | 0,141                   | 2,50                        | 4,09  | 4,58  | 4,80  |
| $\alpha$ -Mn | 25                 | 0,132                   | –                           | 19,0  | 22,8  | 35,9  |
| $\beta$ -Mn  | 25                 | 0,132                   | 14,8                        | 21,6  | 25,6  | –     |
| $\gamma$ -Mn | 25                 | 0,132                   | –                           | 12,3  | 15,1  | –     |
| Fe           | 26                 | 0,126                   | 4,85                        | 9,98  | 11,90 | 16,50 |
| Co           | 27                 | 0,125                   | 8,55                        | 11,9  | 12,18 | 14,20 |
| Ni           | 28                 | 0,124                   | 6,61                        | 11,40 | 13,00 | 16,70 |
| Rh           | 45                 | 0,134                   | 4,99                        | 7,57  | 8,50  | 10,80 |
| Ir           | 77                 | 0,136                   | 4,11                        | 6,09  | 6,40  | 7,66  |
| Pt           | 78                 | 0,139                   | 6,77                        | 8,55  | 8,99  | 10,20 |

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                         | $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$                  |         |         |         |        |
|---|--|--|---------|---------|---------|--------|
|   |  | 100 К  | 200 К   | 300 К   | 800 К   |        |
| Кореляційний зв'язок:                           |  | Розрахунковий коефіцієнт кореляції ( $r_p$ ) |         |         |         |        |
| $\alpha \sim Z$                                 |  | -0,4455                                      | -0,4941 | -0,2581 | -0,5064 |        |
| $\alpha \sim r_A$                               |  | 0,8116                                       | 0,6946  | 0,8278  | 0,2606  |        |
| N   |  | 24   | 27      | 29      | 20      |        |
| $f = N-2$                                       |  | 22   | 25      | 27      | 18      |        |
|   |  | Критичний коефіцієнт кореляції               |         |         |         |        |
| $r_{кр.} \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}; f = N-2\}$ |  | $\alpha = 0,05$                              | 0,4044  | 0,3809  | 0,3673  | 0,4438 |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 0,5151  | 0,4869  | 0,4705  | 0,5614 |
| $\alpha \sim Z$                                 | $\xi_1(r)$<br>$\xi_2(r)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 0,908   | 0,771   | 1,423   | 0,876  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 1,102   | 1,297   | 0,703   | 1,141  |
|   | $\xi_1(r)$<br>$\xi_2(r)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 1,156   | 0,985   | 1,823   | 1,109  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 0,865   | 1,015   | 0,549   | 0,902  |
| $\alpha \sim r_A$                               | $\xi_1(r)$<br>$\xi_2(r)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 0,498   | 0,548   | 0,444   | 1,703  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 2,007   | 1,824   | 2,254   | 0,587  |
|   | $\xi_1(r)$<br>$\xi_2(r)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 0,635   | 0,701   | 0,568   | 2,154  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 1,576   | 1,427   | 1,759   | 0,464  |
| Кореляційний зв'язок:                           |  | Статистика Стюдента ( $t_p$ )                |         |         |         |        |
| $\alpha \cdot 10^6 \sim Z$                      |  | -2,3340                                      | -2,8416 | -1,3882 | -2,4916 |        |
| $\alpha \cdot 10^6 \sim r_A$                    |  | 6,5160                                       | 4,8277  | 7,6670  | 1,1452  |        |
| $t_T \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}; f = N-2\}$     |  | $\alpha = 0,05$                              | 2,074   | 2,060   | 2,052   | 2,101  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 2,819   | 2,787   | 2,771   | 2,878  |
| $\alpha \sim Z$                                 | $\xi_1(t)$<br>$\xi_2(t)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 0,889   | 0,725   | 1,478   | 0,843  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 1,125   | 1,379   | 0,677   | 1,186  |
|   | $\xi_1(t)$<br>$\xi_2(t)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 1,208   | 0,981   | 1,996   | 1,155  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 0,828   | 1,020   | 0,501   | 0,866  |
| $\alpha \sim r_A$                               | $\xi_1(t)$<br>$\xi_2(t)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 0,318   | 0,427   | 0,268   | 1,835  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 3,142   | 2,344   | 3,736   | 0,545  |
|   | $\xi_1(t)$<br>$\xi_2(t)$                 | $\alpha = 0,05$                              | 0,433   | 0,577   | 0,361   | 2,513  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 2,311   | 1,732   | 2,767   | 0,398  |
| Кореляційний зв'язок:                           |  | Статистика перетворення Фішера ( $z_p$ )     |         |         |         |        |
| $c_p \sim Z$                                    |  | -0,4791                                      | -0,5415 | -0,2641 | -0,2049 |        |
| $c_p \sim r_A$                                  |  | 1,1317                                       | 0,8568  | 1,1811  | 0,2668  |        |
| $z_T \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}\}$              |  | $\alpha = 0,05$                              | 1,96    | 1,96    | 1,96    | 1,96   |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 2,58    | 2,58    | 2,58    | 2,58   |
| $S_Z$   |  | 0,2182                                       | 0,2041  | 0,1961  | 0,2425  |        |
| $(z_T \cdot S_Z)$                               |  | $\alpha = 0,05$                              | 0,4277  | 0,4000  | 0,3844  | 0,4753 |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 0,5630  | 0,5266  | 0,5059  | 0,6257 |
| $\alpha \sim Z$                                 | $\xi_1(\check{Z})$<br>$\xi_2(\check{Z})$ | $\alpha = 0,05$                              | 0,893   | 0,739   | 1,456   | 0,852  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 1,120   | 1,354   | 0,687   | 1,174  |
|   | $\xi_1(\check{Z})$<br>$\xi_2(\check{Z})$ | $\alpha = 0,05$                              | 1,175   | 0,972   | 1,916   | 1,122  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 0,851   | 1,028   | 0,522   | 0,891  |
| $\alpha \sim r_A$                               | $\xi_1(\check{Z})$<br>$\xi_2(\check{Z})$ | $\alpha = 0,05$                              | 0,378   | 0,467   | 0,325   | 1,781  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 2,646   | 2,142   | 3,073   | 0,561  |
|   | $\xi_1(\check{Z})$<br>$\xi_2(\check{Z})$ | $\alpha = 0,05$                              | 0,497   | 0,615   | 0,428   | 2,345  |
|   |  | $\alpha = 0,01$                              | 2,010   | 1,627   | 2,335   | 0,426  |

Таблиця 5

Теплофізичні властивості вакуумних матеріалів [35,36]

| Класи матеріалів | Матеріал (хемічний символ) | Протонне число (порядковий номер у Періодичній системі) | Відносна атомна маса | Температура топлення, К | Середній температурний коефіцієнт лінійного термічного розширення (за температур 273–373 К) ( $\alpha$ , $10^{-7}$ ), $K^{-1}$ |
|------------------|----------------------------|---|----------------------|-------------------------|--|
| метали           | Al                         | 13  | 26,981               | 931                     | 238  |
|                  | W                          | 74  | 183,850              | 3683                    | 44   |
|                  | Fe                         | 26  | 55,847               | 1808                    | 119  |
|                  | Cu                         | 29  | 63,546               | 1356                    | 165  |
|                  | Mo                         | 42  | 95,940               | 2898                    | 55   |
|                  | Ni                         | 28  | 58,700               | 1725                    | 133  |
|                  | Pd                         | 46  | 106,400              | 1827                    | 116  |
|                  | Pt                         | 78  | 195,090              | 2046                    | 90   |
|                  | Ag                         | 47  | 107,868              | 1233                    | 189  |
|                  | Ta                         | 73  | 180,948              | 3269                    | 65   |
|                  | Ti (йодидний)              | 22  | 47,900               | 1998                    | 81*  |
| Zr (йодидний)    | 40                         | 91,220  | 2118                 | 54*                     |  |
| стопи            | мосяж Л-68                 | –   | –                    | 1211                    | 184  |
|                  | монель                     | –   | –                    | 1523                    | 137  |
|                  | ніхром                     | –   | –                    | 1673                    | 125  |
|                  | ковар (ферніко)            | –   | –                    | 1723                    | 45–55**  |
|                  | сталь 1X18H9               | –   | –                    | 1673                    | 160  |
|                  | сталь 1X18H9T              | –   | –                    | 1723                    | 160  |
| різні            | електрографіт              | –   | –                    | 4073–4173               | 8–18 (II)  |
|                  | слюда (мусковіт)           | –   | –                    | 1573                    | 30   |
|                  | кварц (топлений)           | –   | –                    | 1973                    | 5  |
|                  | скло                       | –   | –                    | –                       | 30–120   |
| кераміка         | глиноземна                 | –   | –                    | 2273                    | 46–70***   |
|                  | магнезійна                 | –   | –                    | 1873                    | 70–80***   |

\* за 293 – 473 К; \*\* за 293 – 573 К; \*\*\* за 293 – 373 К

### 2.5. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від радіусу атома первня та його порядкового номера в Періодичній системі первнів (кореляційна аналіза).

У табл.3 зведено значення лінійного коефіцієнта теплового розширення за температури 100, 200; 300; та 800 К, а також порядковий номер  $Z$  та радіус атома  $r_A$  для 30 металів [1].

На рис. 6–9 приведено залежності коефіцієнта лінійного розширення 30 металів [1] від порядкового номера ( $Z$ ) та радіусу атома ( $r_A$ ) за температури 100, 200; 300 та 800 К. Як видно з рис.6–9, між лінійним коефіцієнтом теплового розширення, радіусом атома та порядковим номером металу у Періодичній системі первнів немає лінійного зв'язку за температур 100, 200; 300 та 800 К.

У табл. 4. зведено результати перевірки нульової гіпотези  $H_0$  рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції залежностей  $\alpha = f(Z)$  та  $\alpha = f(r_A)$ . Як видно з табл. 4, ступінь лінійності для кореляційного зв'язку «лінійний коефіцієнт теплового розширення

$\alpha$  від порядкового номера первня  $Z$  у Періодичній системі первнів» складає:

- для  $\alpha = 0,05$   $\xi_2(r) = 0,70 - 1,30$ ;  $\xi_2(t) = 0,68 - 1,38$ ;  $\xi_2(Z) = 0,69 - 1,35$  (для всіх температур);
- для  $\alpha = 0,01$   $\xi_2(r) = 0,55 - 1,02$ ;  $\xi_2(t) = 0,50 - 1,02$ ;  $\xi_2(Z) = 0,52 - 1,03$  (для всіх температур), а ступінь нелінійності у цьому зв'язку складає:
- для  $\alpha = 0,05$   $\xi_1(r) = 0,77 - 1,42$ ;  $\xi_1(t) = 0,73 - 1,48$ ;  $\xi_1(Z) = 0,74 - 1,46$  (для всіх температур);
- для  $\alpha = 0,01$   $\xi_1(r) = 0,99 - 1,82$ ;  $\xi_1(t) = 0,98 - 2,00$ ;  $\xi_1(Z) = 0,97 - 1,92$  (для всіх температур).

І, навпаки, для кореляційного зв'язку «лінійний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha$  від радіусу атома  $r_A$ » ступінь лінійності дорівнює:

- для  $\alpha = 0,05$   $\xi_2(r) = 0,59 - 2,25$ ;  $\xi_2(t) = 0,55 - 3,74$ ;  $\xi_2(Z) = 0,56 - 3,07$  (для всіх температур);
- для  $\alpha = 0,01$   $\xi_2(r) = 0,46 - 1,76$ ;  $\xi_2(t) = 0,40 - 2,77$ ;  $\xi_2(Z) = 0,43 - 2,34$  (для всіх температур), а ступінь нелінійності у цьому зв'язку складає:  $\xi_1(r) = 0,44 - 1,70$ ;  $\xi_1(t) = 0,27 - 1,84$ ;  $\xi_1(Z) = 0,33 - 1,78$  (для  $\alpha = 0,05$ ) та  $\xi_1(r) = 0,57 - 2,15$ ;  $\xi_1(t) = 0,36 - 2,51$ ;  $\xi_1(Z) = 0,43 - 2,35$  (для  $\alpha = 0,01$ ), що дозволяє зробити

висновок: узагальнена залежність  $\alpha = f(Z)$  для 30 металів та інтервалу температур 100–800 К є лінійною, з вищим ступенем нелінійності, а залежність  $\alpha = f(\gamma_A)$  для 30 металів та інтервалу температур 100–300 К є лінійною з вищим ступенем лінійності. А залежність  $\alpha = f(\gamma_A)$  для 30 металів та температури 800 К є нелінійною, з вищим ступенем нелінійності.

Пояснити виявлені властивості можна наступним чином. Під час кристалізації металів (наприклад, у процесі охолодження розтопів) одночасно утворюється величезна кількість дрібних кристаликів, які заважають один одному вирости і набути правильної форми. Тому будь-який металевий виріб має полікристалічну структуру, що складається із великої кількості дрібних кристаликів – 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.

**2.6. Теплофізичні властивості вакуумних матеріалів** за [35, 36] приведені в табл.5, а саме: металів, стопів металів, різних інших матеріалів [електрографіту, слюди (мусковіту), кварцу (топленого), скла та кераміки]. Як видно з табл. 5, під час зміни атомної маси криць від 47,90 до 195, 09 температура топлення змінюється від 931 до 3683 К, а середній температурний коефіцієнт лінійного термічного розширення в інтервалі температур 273 – 373 К (для Ti та Zr – від 293 до 473 К) змінюється від  $(44-238) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Температура топлення стопів змінюється від 1211 до 1723 К, а середній температурний коефіцієнт лінійного термічного розширення в інтервалі температур 273 – 373 К (для коварі (ферніко) – від 293 до 573 К) змінюється від  $(45-184) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Температура топлення електрографіту, слюди (московіту), кварцу (топленого), скла та кераміки змінюється від 1573 до 4173 К, а середній температурний коефіцієнт лінійного термічного розширення в інтервалі температур 273 – 373 К (для кераміки – від 293 до 373 К) змінюється від  $(5-120) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ .

## Висновки

1. За літературними даними досліджено температурну залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення металів та стопів, при цьому встановлено, що лінійний коефіцієнт теплового розширення більшості металів зростає з підвищенням температури. Для більшості досліджених металів значення лінійного коефіцієнта теплового розширення, виміряного перпендикулярно до головної осі кристалу вищчі, ніж значення лінійного коефіцієнта теплового розширення, виміряного паралельно до головної осі кристалу, що можна пояснити їхніми особливими властивостями.

2. Встановлено, що лінійний коефіцієнт теплового розширення всіх досліджених стопів з підвищенням температури зростає.

3. Отримані апроксимаційні залежності лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури для 30 металів та стопів. Встановлено, що для залежностей лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури, лінійного коефіцієнта теплового розширення, виміряного паралельно до головної осі кристалу, від температури та лінійного коефіцієнта теплового розширення, виміряного перпендикулярно до головної осі кристалу, від температури існує надійний зв'язок при апроксимації як поліномом другого порядку, так і поліномом шостого порядку, а також логарифмічною функцією (окрім  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -мангану, залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури яких апроксимується поліномом четвертого і третього порядку та літію і скандію, залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення, виміряного паралельно до головної осі кристалу, від температури та лінійного коефіцієнта теплового розширення, виміряного перпендикулярно до головної осі кристалу, від температури яких носить лінійний характер. Для більшості стопів залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури апроксимується як поліномом першого порядку, так і поліномом другого порядку, окрім, стопу ванадію (V + 40%Mo), залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури якого апроксимується поліномом третього порядку.

4. За результатами кореляційної аналізу, встановлено, що між коефіцієнтом лінійного розширення та радіусом атомів за температур 100, 200, і 300 К є лінійний зв'язок, за температури 800 К – немає лінійного зв'язку; між коефіцієнтом лінійного розширення і порядковим номером металу за температур 100, 200 і 800 К є лінійний зв'язок, за температури 300 К – лінійного зв'язку немає. Подано оцінку ступенів лінійності та нелінійності. Узагальнено залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від порядкового номеру та коефіцієнта лінійного розширення від радіусу атома для 30 металів та інтервалу температур 100–800 К.

**Базюк Л.В.** – викладач кафедри неорганічної та фізичної хемії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Сіренко Г.О.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хемії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

- [1] L.N. Larikov, Ju.F. Jurchenko. *Struktura i svojstva metallov i splavov. Spravochnik: Teplovyje svojstva metallov i splavov* (Naukova dumka, Kiev, 1985).
- [2] V.I. Gomonaj *Fizichna ta koloïdna himija. Pidruchnik* (Nova kniga, Vinnicja, 2007).
- [3] V.I. Gorshkov, I.A. Kuznecov. *Osnovy fizicheskoy himii* (Izdatel'stvo MGU, Moskva, 1993).
- [4] F. Danijel's, R. Olberti. *Fizicheskaja himija* (Mir, Moskva, 1978).
- [5] A.A. Zhuhovickij, L.A. Shvarcman. *Kratkij kurs fizicheskoy himii* (Metallurgija, Moskva, 1979).
- [6] A.D. Zimon, N.F. Leshhenko. *Fizicheskaja himija: Uchebnik* (Himija, Moskva, 2000).
- [7] L.I. Kadaner. *Fizichna i koloïdna hemija* (Vishha shkola, Kiïv, 1983).
- [8] M.H. Karapet'janc. *Himicheskaja termodinamika* (Himija, Moskva, 1975).
- [9] V.A. Kireev *Kratkij kurs fizicheskoy himii* (Himija, Moskva, 1978).
- [10] D.G. Knorre, L.F. Krylova, V.S. Muzykantov. *Fizicheskaja himija* (Vysshaja shkola, Moskva, 1981).
- [11] O.I. Konons'kij. *Fizichna i koloïdna himija: Pidruchnik* (Centr navchal'noi literaturi, Kiïv, 2009).
- [12] K.S. Krasnov. *Fizicheskaja himija* (Vysshaja shkola, Moskva, 1995).
- [13] I.V. Krasovskij, E.I. Vajl', V.D. Bezuglyj. *Fizicheskaja i kolloidnaja himija* (Vishha shkola, Kiev, 1983).
- [14] V.I. Lebid'. *Fizichna himija: Pidruchnik* (Folio, Harkiv, 2005).
- [15] V.C. Lipatnikov, K.M. Kozakov. *Fizichna i koloïdna himija* (Vishha shkola, Kiïv, 1983).
- [16] A.B. Luk'janov. *Fizicheskaja i kolloidnaja himija* (Himija, Moskva, 1988).
- [17] K. Ljupis. *Himicheskaja termodinamika materialov* (Metallurgija, Moskva, 1989).
- [18] A.S. Moroz, A.G. Koval'ova. *Fizichna ta koloïdna himija* (Svit, L'viv, 1994).
- [19] O.M. Poltorak. *Termodinamika v fizicheskoy himii* (Vysshaja shkola, Moskva, 1991).
- [20] A.V. Svidzins'kij. *Lekcii z termodinamiki: Navch. Posibnik* (Vezha, Luc'k, 1999).
- [21] I.A. Semiohin. *Fizicheskaja himija* (Izdatel'stvo MGU, Moskva, 2001).
- [22] A.G. Stromberg, D.P. Semchenko. *Fizicheskaja himija: Uchebnik* (Vysshaja shkola, Moskva, 1999).
- [23] A.G. Stromberg, D.P. Semchenko. *Fizicheskaja himija* (Vysshaja shkola, Moskva, 1988).
- [24] K.S. Krasnov, N.K. Vorob'ev, I.N. Godnev i dr. *Fizicheskaja himija. V 2-h kn.* (Vysshaja shkola, Moskva, 2001).
- [25] V.I. Kabachnij, L.K. Osipenko, L.D. Grican ta in. *Fizichna i koloïdna himija* (Prapor, vidavnictvo Ukr.FA, Harkiv, 1999).
- [26] Ju.G. Frolov, V.V. Belik. *Fizicheskaja himija* (Himija, Moskva, 1993).
- [27] L.B. Cvetkova. *Fizichna himija: Teorija i zadachi: Navch. Posib* (Magnolija-2006, L'viv, 2008).
- [28] P. Jetkins. *Fizicheskaja himija. V 2-h tomah.* (Mir, Moskva, 1980).
- [29] Ju.P. Adler, E.V. Markova, Ju.V. Granovskij *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij* (Nauka, Moskva, 1976).
- [30] M.N. Stepnov *Statisticheskaja obrabotka rezul'tatov mehanicheskikh ispytanij* (Mashinostroenie, Moskva, 1972).
- [31] P. Mjuller, P. Nojman, R. Shtorm. *Tablicy po matematicheskoy statistike* (Finansy i statistika, Moskva, 1982).
- [32] *Kratkij spravochnik fiziko-himicheskikh velichin.* / Pod red. A.A. Ravdelja, A.M. Ponomarevoj (Himija, Leningrad, 1983).
- [33] G.O. Sirenko, L.V. Bazjuk, N.V. Meshherjakova. *Fizika i himija tverdogo tila* 12(1), 197 (2011).
- [34] L.V. Bazjuk, G.O. Sirenko, N.V. Meshherjakova. *Visnik Prikarpat'skogo nacional'nogo universitetu imeni Vasilja Stefanika HIII*, 102 (2011).
- [35] V.P. Basov, V.M. Radionov. *Himija* (Karavela, Kiïv, 2005).
- [36] E.N. Martinson, E.G. Pleshhenko. *BSJe* 4, 245 (1971).

L.V. Bazyuk, H.O. Sirenko

## **Thermophysical Properties of Metals and Alloys: 4. Linear Coefficient of Thermal Expansion Dependence from Temperature and Radius of Atoms**

<sup>1</sup>*Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine  
Tel. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: [sirenkog@rambler.ru](mailto:sirenkog@rambler.ru)*

The dependence of linear coefficient of thermal expansion 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 linear coefficient of thermal expansion increases. Established

that growth between linear coefficient of thermal expansion and the radius of metal atoms no linear connection between a metals of periodic elements at temperatures 100, 200, 300 and 800 K is close linear relationship.

**Keywords:** metals, alloys, linear coefficient of thermal expansion, thermophysical properties, radius of metal atoms, correlation analysis, regression analysis.