

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

$$H_0: \rho = 0 \quad \uparrow \quad (1)$$
$$r_p \neq 0,$$

та альтернативну гіпотезу

$$H_1: \rho \neq 0 \quad \uparrow \quad (2)$$
$$r_p \neq 0,$$

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]:

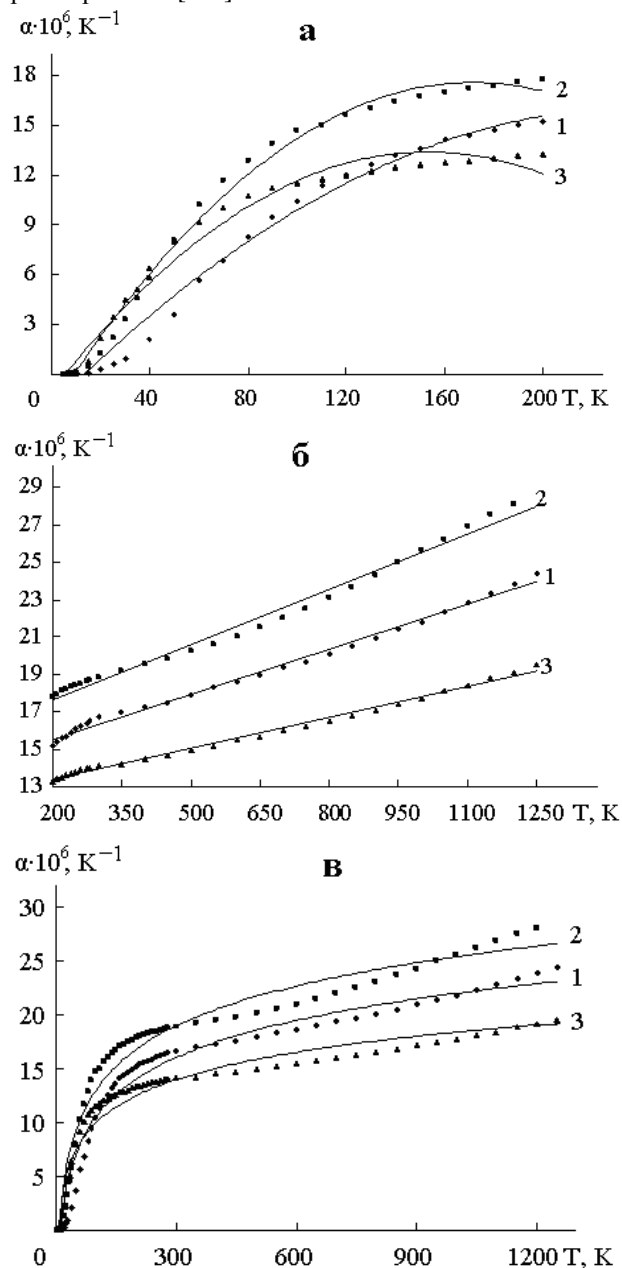
1. За критичним значенням коефіцієнта кореляції  $r_{\text{ед}}$ , [31];

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:

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

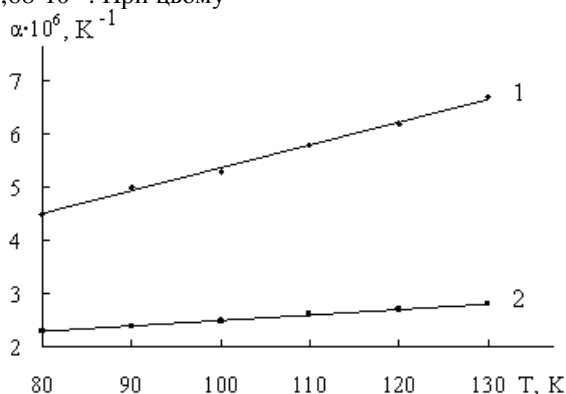
де  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – коефіцієнти розширення, виміряні паралельно до осей другого порядку. Об'ємний коефіцієнт теплового розширення  $\beta$  для всіх сингоній пов'язаний із середнім коефіцієнтом лінійного розширення так:

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

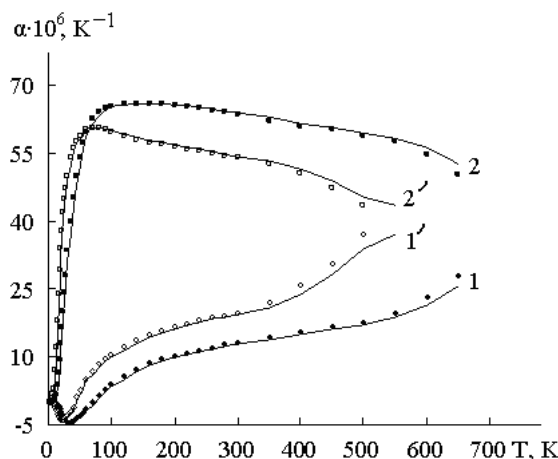
Досліджували також температурну залежність коефіцієнтів теплового розширення металів, виміряних паралельно ( $\alpha_{\parallel}$ ) та перпендикулярно ( $\alpha_{\perp}$ ) до головної осі кристалу.

**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.

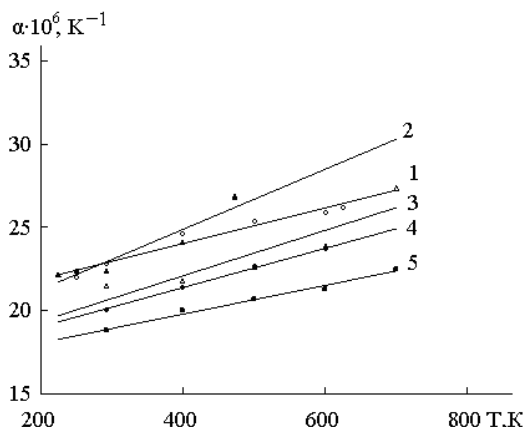
За даними [1] побудовано температурні залежності стопів відносно коефіцієнта лінійного розширення.

**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.**

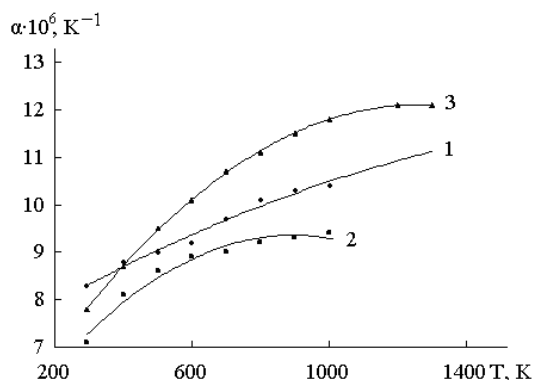
**2. На рис. 5 приведено залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення ( $\alpha$ ) стопів титану: Ti + 20%Zr, Ti + 50%Zr, Ti + 2%Mo від температури (Т). Як видно з рис. 5, лінійний коефіцієнт теплового розширення усіх стопів титану зростає зі збільшенням температури. Найвищі його значення спостерігаються 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: 1X18Н9Т3, 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  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  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  $y = \alpha$ ,  $\alpha_{II}$ ,  $\alpha_{\perp}$ ,  $x = T$ . 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  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  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  $\alpha_{\perp} \sim f(T)$  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	
Іридій	$y = -1 \cdot 10^{-16}x^6 + 5 \cdot 10^{-17}x^5 - 9 \cdot 10^{-10}x^4 + 8 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0004x^2 + 0,0866x - 1,4462$	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

Теплофізичні властивості металів та сплавів...

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

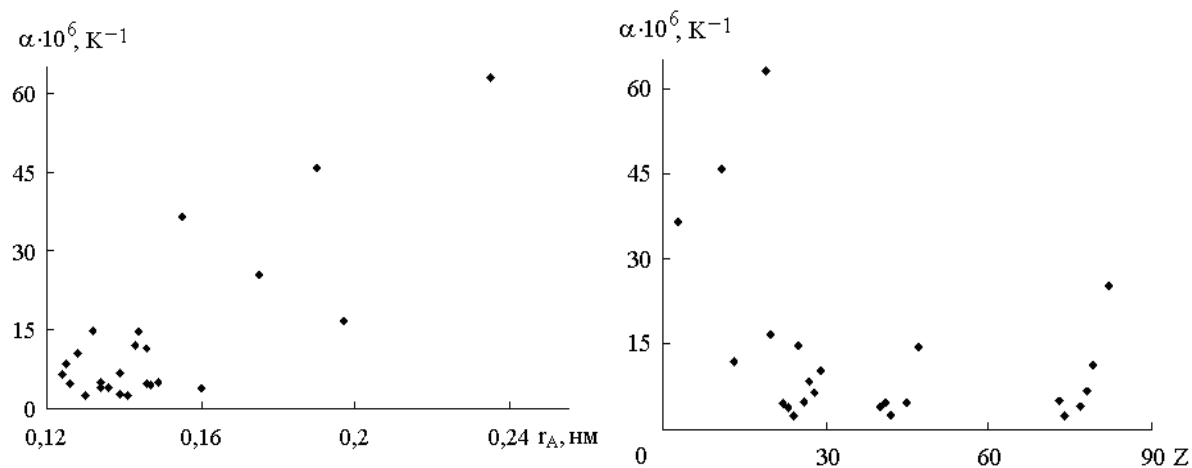
Таблиця 2

Математичні моделі залежностей лінійного коефіцієнта теплового розширення сплавів від температури

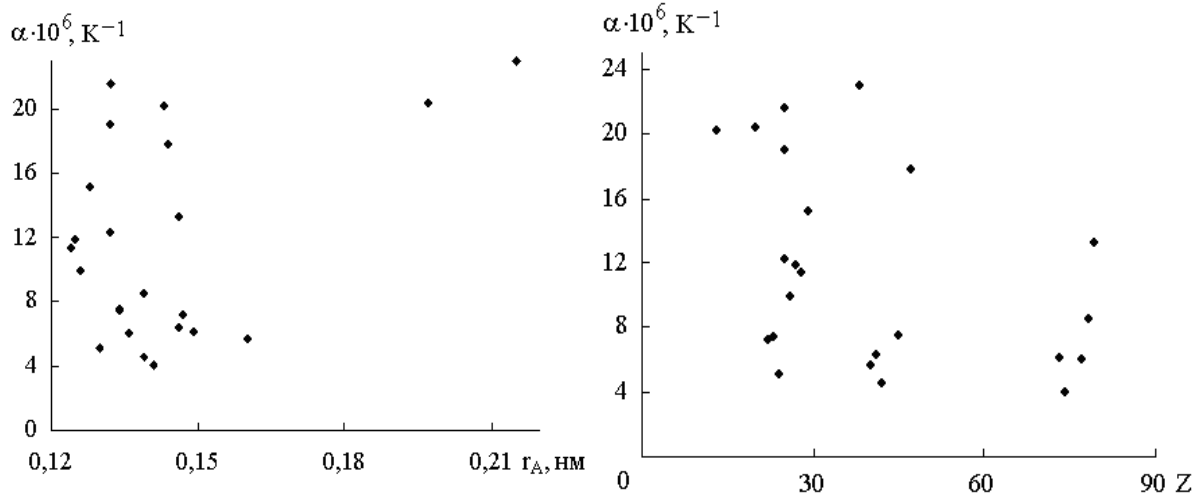
Сплави	Рівняння апроксимації	R <sup>2</sup>
Al + 4%Cu	$y = 0,0107x + 19,718$	0,9508
Al + 5%Mg	$y = 0,018x + 17,692$	0,8947
Al + 1,5%Zr	$y = 0,0136x + 16,635$	0,831
Al + 10%Si	$y = 0,0119x + 16,661$	0,9974
Al + 2%Mo	$y = 0,0086x + 16,379$	0,9857
Ti + 20%Zr	$y = -1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0043x + 7,1237$	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



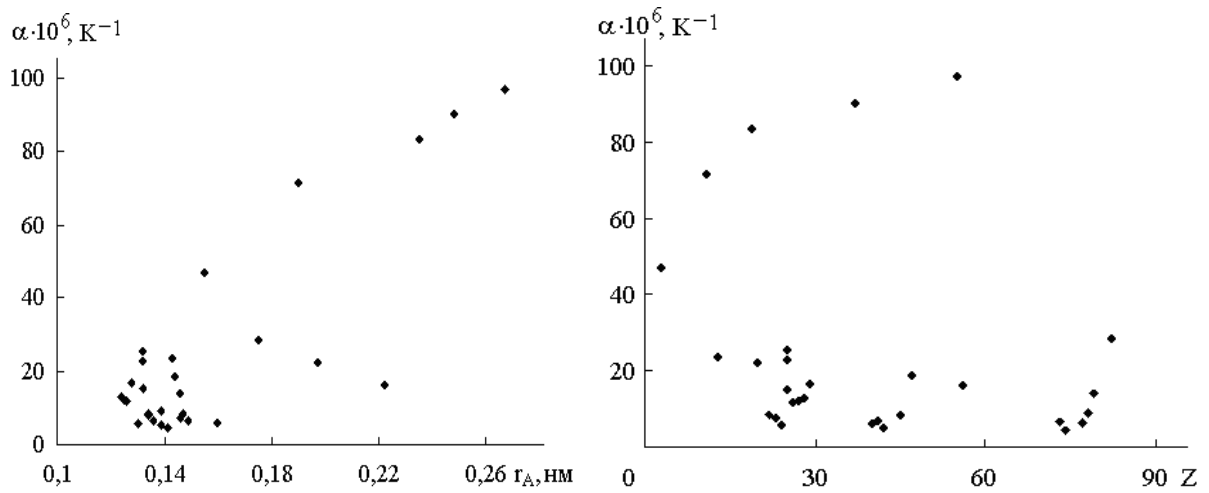
Mo + 0,5%Ta	$y = 0,0024x + 4,1958$	0,9829
Mo + 50%Re	$y = 0,0019x + 5,0684$	0,981
X5M	$y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0083x + 7,8971$	0,997
4X13	$y = -1 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,006x + 8,0542$	0,9968
12X1213МБФР	$y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0046x + 9,815$	0,9875
1X12B2MФ	$y = -3 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,007x + 7,3652$	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



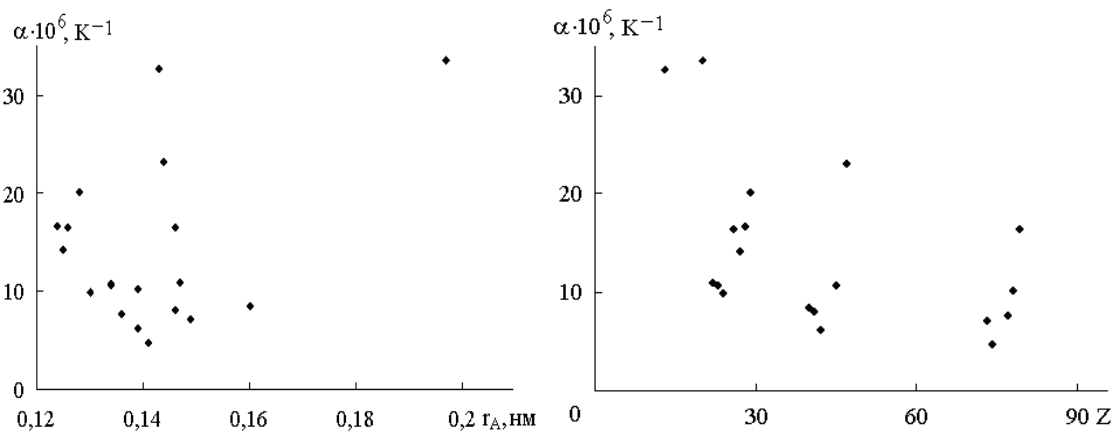
**Рис. 6.** Узагальнена залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 100 К.



**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 елементів

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
$\alpha \sim Z$	$\xi_1(r)$	$\alpha = 0,05$	0,908	0,771	1,423	0,876
		$\alpha = 0,01$	1,102	1,297	0,703	1,141
	$\xi_2(r)$	$\alpha = 0,05$	1,156	0,985	1,823	1,109
		$\alpha = 0,01$	0,865	1,015	0,549	0,902
$\alpha \sim r_A$	$\xi_1(r)$	$\alpha = 0,05$	0,498	0,548	0,444	1,703
		$\alpha = 0,01$	2,007	1,824	2,254	0,587
	$\xi_2(r)$	$\alpha = 0,05$	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
$\alpha \sim Z$	$\xi_1(t)$	$\alpha = 0,05$	0,889	0,725	1,478	0,843
		$\alpha = 0,01$	1,125	1,379	0,677	1,186
	$\xi_2(t)$	$\alpha = 0,05$	1,208	0,981	1,996	1,155
		$\alpha = 0,01$	0,828	1,020	0,501	0,866
$\alpha \sim r_A$	$\xi_1(t)$	$\alpha = 0,05$	0,318	0,427	0,268	1,835
		$\alpha = 0,01$	3,142	2,344	3,736	0,545
	$\xi_2(t)$	$\alpha = 0,05$	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
$\alpha \sim Z$	$\xi_1(\check{Z})$	$\alpha = 0,05$	0,893	0,739	1,456	0,852
		$\alpha = 0,01$	1,120	1,354	0,687	1,174
	$\xi_2(\check{Z})$	$\alpha = 0,05$	1,175	0,972	1,916	1,122
		$\alpha = 0,01$	0,851	1,028	0,522	0,891
$\alpha \sim r_A$	$\xi_1(\check{Z})$	$\alpha = 0,05$	0,378	0,467	0,325	1,781
		$\alpha = 0,01$	2,646	2,142	3,073	0,561
	$\xi_2(\check{Z})$	$\alpha = 0,05$	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] Л.Н. Лариков, Ю.Ф. Юрченко. *Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник: Тепловые свойства металлов и сплавов.* Наукова думка, Киев. 438с. (1985).
- [2] В.І. Гомонай *Фізична та колоїдна хімія. Підручник.* Нова книга, Вінниця. 496с. (2007).
- [3] В.И. Горшков, И.А. Кузнецов. *Основы физической химии.* Изд-во МГУ, Москва. 335с. (1993).
- [4] Ф. Даниэльс, Р. Олберти. *Физическая химия.* Мир, Москва. 647с. (1978).
- [5] А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман. *Краткий курс физической химии.* Металлургия, Москва. 368с. (1979).
- [6] А.Д. Зимон, Н.Ф. Лещенко. *Физическая химия: Учебник.* Химия, Москва. 320с. (2000).
- [7] Л.І. Каданер. *Фізична і колоїдна хемія.* Вища шк., Київ. 288 с. (1983).
- [8] М.Х. Карапетьянц. *Химическая термодинамика.* Химия, Москва. 584с. (1975).
- [9] В.А. Киреев *Краткий курс физической химии. . . : Химия, Мрсква. 624с. (1978).*
- [10] Д.Г. Кнорре, Л.Ф. Крылова, В.С. Музыкантов. *Физическая химия.* Высш. шк., Москва. 328с. (1981).
- [11] О.І. Кононський. *Фізична і колоїдна хімія: Підручник.* Центр учбової л-ри, Київ.: 312 с. (2009).
- [12] К.С. Краснов. *Физическая химия.* Высш. шк., Москва. 512 с. (Ч 1); 332 с. (Ч 2). (1995).
- [13] И.В. Красовский, Е.И. Вайль, В.Д. Безуглый. *Физическая и коллоидная химия.* Вища шк., Киев. 296с. (1983).
- [14] В.І. Лебідь. *Фізична хімія: Підручник.* Фоліо, Харків. 480с. (2005).
- [15] В.С. Ліпатніков, К.М. Козаков. *Фізична і колоїдна хімія.* Вища шк., Київ. 198с. (1983).
- [16] А.Б. Лукьянов. *Физическая и коллоидная химия.* Химия, Москва. 288с. (1988).
- [17] К. Люпис. *Химическая термодинамика материалов.* Металлургия, Москва. 503 с. (1989).
- [18] А.С. Мороз, А.Г. Ковальова. *Фізична та колоїдна хімія.* Світ, Львів. 278с. (1994).
- [19] О.М. Полторац. *Термодинамика в физической химии.* Высш. шк., Москва. 320с. 1991.
- [20] А.В. Свідзинський. *Лекції з термодинаміки: Навч. посібник.* Вежа, Луцьк. 83с. (1999).
- [21] И.А. Семиохин. *Физическая химия.* Изд-во МГУ, Москва. 272 с. (2001).
- [22] А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко. *Физическая химия: Учебник.* Высш. шк., Москва. 528 с. (1999).
- [23] А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко. *Физическая химия.* Высш. шк., Москва. 496с. (1988).
- [24] К.С. Краснов, Н.К. Воробьев, И.Н. Годнев и др. *Физическая химия.* В 2-х кн. Высш. шк., Москва. 319с. (2001).
- [25] В.І. Кабачний, Л.К. Осіпенко, Л.Д. Грицан та ін. *Фізична і колоїдна хімія.* Прапор, вид-во Укр.ФА, Харків. 368с. (1999).
- [26] Ю.Г. Фролов, В.В. Белик. *Физическая химия.* Химия, Москва. 464 с. (1993).
- [27] Л.Б. Цветкова. *Фізична хімія: Теорія і задачі: Навч. посіб.* Магнолія-2006, Львів: 415с. (2008).
- [28] П. Эткинс. *Физическая химия. В 2-х томах.* Мир, Москва. 582с. (Т. 1). 584с. (Т. 2). (1980).
- [29] Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.* Наука, Москва. 280с. (1976).
- [30] М.Н. Степнов *Статистическая обработка результатов механических испытаний.* Машиностроение, Москва. 232с. (1972)
- [31] П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм. *Таблицы по математической статистике.* Финансы и статистика, Москва. 272с. (1982).
- [32] *Краткий справочник физико-химических величин.* / Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. Химия, Ленинград. 232с. (1983).
- [33] Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк, Н.В. Мещерякова. *Термофізичні властивості металів та сплавів: залежність зміни ентальпії від температури та радіусу атомів.* //Фізика і хімія твердого тіла. **12**, (1), сс. 197-207. (2011).
- [34] Л.В. Базюк, Г.О. Сіренко, Н.В. Мещерякова *Термофізичні властивості металів та сплавів: 2. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури та радіусу атомів.* //Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, XIII, сс. 102–121. (2011).
- [35] В.П. Басов, В.М. Радіонов. *Хімія.* Каравела, Київ. 320с. (2005).
- [36] Е.Н. Мартинсон, Е.Г. Плещенко. *Вакуумные материалы.* // БСЭ. **4**,. сс.245–246. (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.

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