ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 12, № 4 (2011) С. 1026-1038

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 12, № 4 (2011) P. 1026-1038

УДК 536 + 539.2

ISSN 1729-4428

Л.В. Базюк, Г.О. Сіренко

Теплофізичні властивости металів та стопів: 2. Залежність коефіцієнта теплопровідности від температури та радіусу атомів

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна, e-mail: sirenkog@rambler.ru

За літературними даними вивчено, проаналізовано методами кореляційної та реґресійної аналізи та обґрунтовані залежности коефіцієнта теплопровідности від температури, порядкового номера та радіусу атома металів. Показано, що зі збільшенням температури для більшости металів та стопів коефіцієнт теплопровідности зменшується. Встановлено, що між коефіцієнтом теплопровідности і радіусом атомів металів та їх порядковим номером у Періодичній системі первнів існує нелінійний зв'язок.

Ключові слова: метали, стопи, коефіцієнт теплопровідности, теплофізичні властивости, радіус атома металів, кореляційна аналіза, реґресіна аналіза.

Стаття поступила до редакції 07.07.2011; прийнята до друку 15.09.2011.

Вступ

Відомо [1−28], що коефіцієнт теплопровідности (λ) залежить від температури (T), але відсутні: ретельний аналіз цієї залежности для металів та стопів, не приведені апроксимаційні функції, що описують ці залежности та не виявлений кореляційний зв'язок між коефіцієнтом теплопровідности та температурою, порядковим номером і радіусом атома первня Періодичної таблиці.

Метою роботи є дослідження залежности коефіцієнта теплопровідности 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 реґресійний аналізи виконані за [29−31]. Вибірковий коефіцієнт кореляції зв'язку між y і x (r_p) обчислювали за формулою [29,30]. Висували нульову гіпотезу рівности нулю ґенерального коефіцієнта кореляції

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

та альтернативну гіпотезу

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

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

$$r_p \to \rho.$$

Перевірку H_0 здійснювали для рівнів значущости α = 0,05 та α = 0,01 та ступенем вільностей f [33, 34]:

1. За критичним значенням коефіцієнта кореляції $r_{êð.}$ [31];
2. За критерієм Стьюдента t_T, [30];
3. За перетворенням Фішера [30] та добутку $(z_T \cdot s_z)$.

II. Результати та обговорення

2.1. Залежність коефіцієнта теплопровідности металів від температури.

За даними [1] побудовано температурні залежности металів відносно λ за низьких (T≤100 K) та високих (в межах від 50−100 до 300−2500 K) температур.

На рис. 1 приведено залежности коефіцієнта теплопровідности (λ) металів IA ґрупи Періодичної системи первнів від температури (T) в інтервалі температур 0−50 K (рис.1а) та в інтервалі 100−400 K (рис.1б). Як видно з рис. 1а, коефіцієнт теплопровідности натрію (крива 1) та калію (крива 2) зростає від λ = 3180 до λ = 4820 Вт/м·K (для натрію) та від λ ≈ 1200 до λ = 1960 Вт/м·K (для калію) із збільшенням температури від ~ 0 K до температури піка максимального його значення (T_{max} = 5 K для натрію та T_{max} = 3K для калію). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідности різко спадає від λ = 4820 до λ = 120 Вт/м·K (для натрію) та від λ ≈ 1960 до λ = 98,5 Вт/м·K (для калію) під час збільшення температури від T_{max} до 20−50 K. Як видно з рис. 1б, із збільшенням температури від T = 50 до T = 400 K коефіцієнт теплопровідности всіх лужних металів незначно зменшується: літію (криві 1,1′) від λ = 235 до λ = 72,1 Вт/м·K, натрію (крива 2) від λ = 158 до λ = 120 Вт/м·K, калію (крива 3) λ = 112 до λ = 98,5 Вт/м·K, рубідію (крива 4) λ = 62,7 до λ = 58,1 Вт/м·K і не залежить від порядкового номера (Z) первня.

На рис. 2 приведено залежність коефіцієнта теплопровідности (λ) міді, срібла та золота від температури (T) в інтервалі температур 0−50 K (рис.2а) та в інтервалі 100−1300 K (рис.2б). Як видно з рис.2а, для золота (крива 3) спостерігається незначне зростання коефіцієнта теплопровідности від λ ≈ 200 до λ = 800 Вт/м·K із збільшенням температури від ~ 0 K до T_{max} = 20 K. З подальшим підвищенням температури від T_{max} = 20 K до 50 K коефіцієнт теплопровідности незначно зменшується від λ = 800 до λ = 439 Вт/м·K. Для срібла та міді (рис.2, крива 1та 2 відповідно) спостерігається значне зростання коефіцієнта теплопровідности від λ = 4800 до λ = 10600 Вт/м·K (для срібла) та від λ ≈ 500 до λ = 5000 Вт/м·K (для міді) із збільшенням температури від ~ 0 K до температури піка максимального його значення (T_{max} = 8 K для срібла та T_{max} = 15K для міді). З подальшим підвищенням температури від T_{max} до 50 K коефіцієнт теплопровідности різко зменшується від λ = 10600 до λ = 700 Вт/м·K (для срібла) та від λ ≈ 5000 до λ = 1500 Вт/м·K (для міді). Як видно з рис. 2б, коефіцієнт теплопровідности металів: міді (крива 1), срібла (крива 2), золота (крива 3) зі збільшенням температури від T = 100 до T = 1300 K лінійно зменшується від λ = 500 до λ = 320 Вт/м·K (для міді), від λ = 431 до λ = 381 Вт/м·K (для срібла) та від λ = 343 до λ = 247 Вт/м·K (для золота) і не залежить від порядкового номера первня відповідного металу.

Аналогічні залежности можна спостерігати для решти металів [1]. Так, за низьких температур, коефіцієнт теплопровідности літію інтенсивно зростає від λ = 197 до λ = 720 Вт/м·K, в той час як коефіцієнт теплопровідности рубідію незначно змінюється від λ = 127 до λ = 188 Вт/м·K із збільшенням температури від ~ 0 K до температури піка максимального його значення (T_{max} = 26 K для літію та T_{max} = 6K для рубідію). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідности літію різко спадає від λ = 720 до λ = 72,1 Вт/м·K та незначно змінюється від λ ≈ 188 до λ = 58,1 Вт/м·K (для рубідію) під час збільшення температури від T_{max} до 50 K.

За низьких температур коефіцієнт теплопровідности магнію різко зростає від λ ≈ 0 до λ = 1212 Вт/м·K із збільшенням температури від ~ 0,5 K до T_{max} ≈ 23 K. З подальшим підвищенням температури від T_{max} ≈ 23 K до 50 K коефіцієнт теплопровідности різко зменшується від λ = 1212 до λ ≈ 200 Вт/м·K. За високих температур коефіцієнт теплопровідности магнію та цинку зменшується від λ = 179 до λ = 98 Вт/м·K (для магнію) та від λ = 145 до λ = 128 Вт/м·K (для цинку) зі збільшенням температури від T = 173 до T = 1173 K (для магнію) та від T = 100 до T = 300 K (для цинку), а залежність λ ~ f (T) носить лінійний характер.

За низьких температур коефіцієнт теплопровідности алюмінію інтенсивно зростає від λ = 2200 до λ = 5200 Вт/м·K, в той же час як коефіцієнт теплопровідности індію незначно змінюється від λ = 520 до λ = 800 Вт/м·K із збільшенням температури від ~ 0 K до температури піка максимального його значення (T_{max} ≈ 12 K для алюмінію та T_{max} =

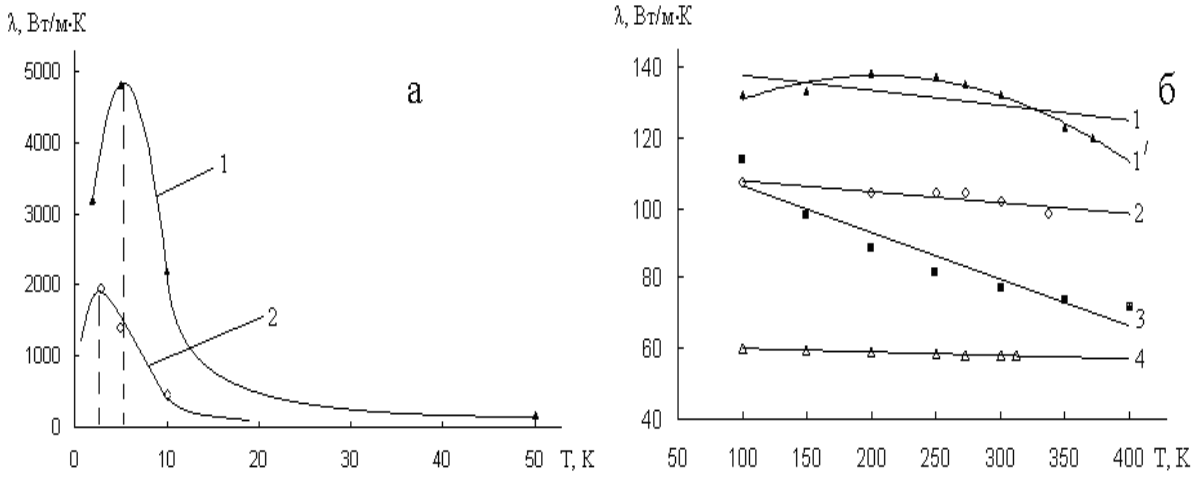

Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідности:
1,1′ − натрію (Z=11); 2 − калію (Z=19); 3 − літію (Z=3); 4 − рубідію (Z=37)
а) в інтервалі температур 0−50 К;
б) в інтервалі температур 50−400 К.

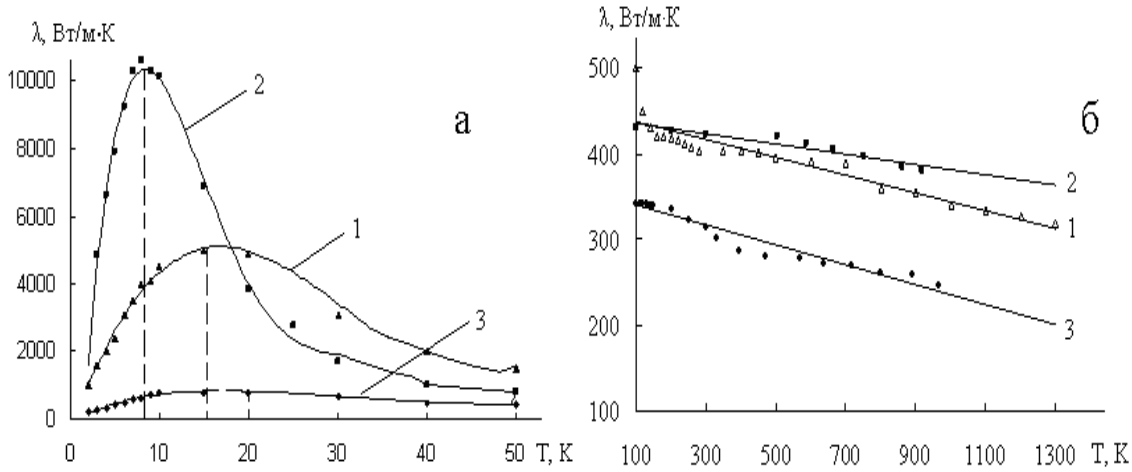

Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідности
1 − міді (Z=29); 2 − срібла (Z=47); 3 − золота (Z=79):
а) в інтервалі температур 0−50 К;
б) в інтервалі температур 100−1300 К.

5 К для індію). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідности алюмінію різко спадає від λ = 5200 до λ = 300 Вт/м·К та незначно зменшується від λ ≈ 800 до λ = 108 Вт/м·К (для індію) під час збільшення температури від T_{max} до 80−100 К. За високих температур, для Al та In, як і в попередніх випадках, з підвищенням температури від 100 до 300 К зменшується коефіцієнт теплопровідности від λ = 300 до λ = 230 Вт/м·К (для алюмінію) та від λ = 108 до λ = 21 Вт/м·К (для індію), в той час як для талію значення коефіцієнта теплопровідности у всьому діапазоні температур майже не змінюються від λ = 63 до λ = 47 Вт/м·К.

За низьких температур для хрому спостерігається значне зростання коефіцієнта теплопровідности від λ ≈ 0 до λ = 553 Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до T_{max} = 25 К. З подальшим підвищенням температури від T_{max} = 25 К до T = 90 К коефіцієнт теплопровідности зменшується від λ = 553 до λ = 143 Вт/м·К. Для молібдену та вольфраму спостерігається значно менше зростання коефіцієнта теплопровідности від λ = 30 до λ = 360 Вт/м·К (для молібдену) та від λ = 38 до λ = 340 Вт/м·К (для вольфраму) із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення (T_{max} ≈ 30−45 К для молібдену та T_{max} = 28−40 К для

вольфраму). З подальшим підвищенням температури від T_{max} до 100 К коефіцієнт теплопровідности незначно зменшується від λ= 360 до λ = 205 Вт/м·К (для молібдену) та від λ ≈ 340 до λ = 132 Вт/м·К (для вольфраму). З підвищенням температури від 100 до 2700 К (для молібдену та вольфраму) та від 100 до 1200 К (для хрому) спостерігається зменшення коефіцієнта теплопровідности металів Cr від λ = 129 до λ = 60 Вт/м·К, Mo від λ = 205 до λ = 68 Вт/м·К, W від λ = 132 до λ = 92 Вт/м·К, при цьому коефіцієнт теплопровідности даних металів не залежить від їх порядкового номера у Періодичній системі первнів.

За низьких температур коефіцієнт теплопровідности заліза інтенсивно зростає від λ = 293 до λ = 873 Вт/м·К, в той час як коефіцієнт теплопровідности ніколу незначно змінюється від λ = 59 до λ = 251 Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення (T_{max} ≈ 20 К для заліза та T_{max} = 35 К для ніколу). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідности заліза різко спадає від λ = 873 до λ = 98 Вт/м·К та незначно зменшується від λ ≈ 251 до λ = 127 Вт/м·К (для ніколу) під час збільшення температури від T_{max} до 100 К. За високих температур коефіцієнт теплопровідности металів: заліза та ніколу зменшується від λ = 82 до λ = 39 Вт/м·К (для заліза) та від λ = 114 до λ = 55 Вт/м·К (для ніколу) з підвищенням температури від ~ 220 до 1670 К, хоча й залежність λ ~ f (T) носить нелінійний характер. Коефіцієнт теплопровідности кобальту зростає від λ ≈ 66 до λ = 126,8 Вт/м·К із збільшенням температури від 220 К до T_{max} = 770 К. З подальшим підвищенням температури від T_{max} =770 К до T = 1670 К коефіцієнт теплопровідности зменшується від λ = 126,8 до λ = 11 Вт/м·К.

За низьких температур коефіцієнт теплопровідности платини різко зростає від λ = 350 до λ = 1300 Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до T_{max} ≈ 6 К. З подальшим підвищенням температури від T_{max} ≈ 6 К до T = 35 К коефіцієнт теплопровідности різко зменшується від λ = 1300 до λ ≈ 200 Вт/м·К, а в інтервалі температур 35 − 100 К спостерігається незначне зменшення коефіцієнта теплопровідности від λ = 200 до λ ≈ 74 Вт/м·К. Зі зростанням температури від T = 100 до T = 1800 К коефіцієнт теплопровідности й надалі незначно зменшується від λ = 74 до λ = 64,5 Вт/м·К.

Отже, коефіцієнт теплопровідности (λ) більшости металів різко зростає із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального їх значення (T_{max}). З подальшим підвищенням температури від T_{max} до 300−2500 К коефіцієнт теплопровідности більшости металів зменшується. Винятком є титан та метали побічної підґрупи V ґрупи Періодичної системи первнів. За низьких температур коефіцієнт теплопровідности титану інтенсивно зростає від λ ≈ 0 до λ = 14 Вт/м·К. Подальше підвищення температури від 50 до 100 К приводить до незначного зростання коефіцієнта теплопровідности титану від λ ≈ 14 до λ = 18 Вт/м·К. За високих температур коефіцієнт теплопровідности цього металу теж незначно зростає від λ = 18 до λ = 20 Вт/м·К з підвищенням температури від 100 до 300 К, що не є характерним для всіх інших металів, а залежність λ ~ f (T) носить лінійний характер. Таке зростання коефіцієнта теплопровідности титану в даному інтервалі температур можна пояснити його особливими властивостями.

Для металів побічної підґрупи V ґрупи Періодичної системи первнів з підвищенням температури від 100 до 2700 К (для ніобію та танталу) та від 100 до 1773 К (для ванадію) коефіцієнт теплопровідности V, Nb, Ta теж незначно зростає від λ = 49 до λ = 102 Вт/м·К (для ніобію), від λ = 63 до λ = 100 Вт/м·К (для танталу) та від λ = 32,1 до λ = 65,6 Вт/м·К (для ванадію), при цьому із зростанням порядкового номера первня коефіцієнт теплопровідности збільшується до температури ~2000 К.

2.2. Залежність коефіцієнта теплопровідности стопів від температури

За даними [1] побудовано температурні залежности стопів відносно коефіцієнта теплопровідности.

На рис. 3 приведено залежність коефіцієнта теплопровідности (λ) стопів міді (мосяжів): латуні Л68 (Cu + 30%Zn), латуні ЛАН 59-3-2 (Cu + 3%Al + 2,5%Ni) та латуні Л62 (Cu + 40%Zn) від температури (T). Зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідности збільшується. Найвищі його значення спостерігаються у латуні Л62 (Cu +40%Zn).

На рис. 4 приведено залежність коефіцієнта теплопровідности (λ)

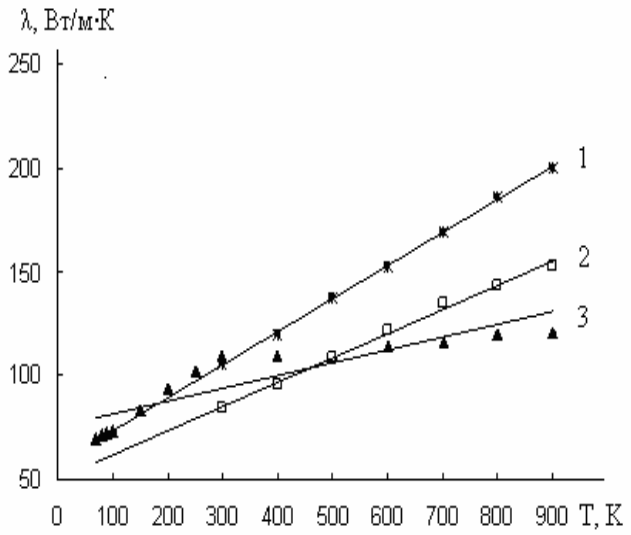

Рис. 3. Залежність коефіцієнта теплопровідности мідних стопів мóсяжів від температури: 1 − латуні Л62 (Cu + 40%Zn),2 − латуні Л68 (Cu + 30%Zn) 3 − латуні ЛАН 59-3-2 (Cu + 3%Al+2,5%Ni).

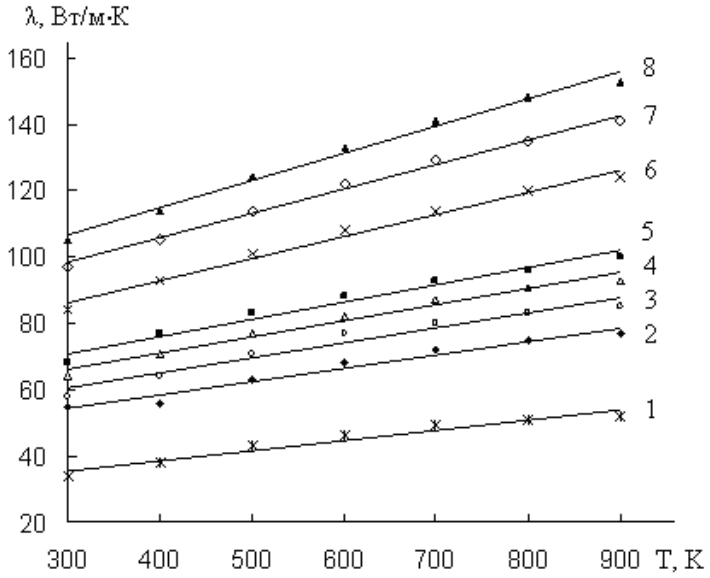

Рис. 4. Залежність коефіцієнта теплопровідности від температури промислових мідних стопів − спижів (брондз, бронз) марки: 1 − Бр 0Ф 10-1 (Cu + 10%Sn + 1%P); 2 − Бр 0Ц 10-2 (Cu + 10%Sn + 2%Zn); 3 − Бр 0С 5-25 (Cu + 5%Sn + 25%Pb); 4 − Бр 0Ц 6-3 (Cu + 6%Sn + 3%Zn); 5 − Бр 0Ц 8-4 (Cu + 8%Sn + 4%Zn); 6 − Бр 0Ц 4-3 (Cu + 4%Sn +

промислових спижів (брондз, бронз) від температури (T). Як і в попередніх випадках коефіцієнт теплопровідности зростає з підвищенням температури. Максимальні значення належать спижу марки Бр А-5, а мінімальні – спижу марки Бр 0Ф 10-1. Залежности описуються лінійними рівняннями. Як видно з рис. 3, чим більший вміст цинку у стопах спижу (криві 2,4,5) і менший вміст станиуму (криві 1, 5, 6) та алюмінію (криві 7, 8), тим вищі значення коефіцієнта теплопровідности.

Аналогічні залежности можна спостерігати для решти стопів [1]. Так, коефіцієнт теплопровідности (λ) стопу міді Cu + 1,5% Be зростає від λ = 17,7 до λ = 180 Вт/м·К зі зростанням температури від T = 20 до T = 375 К, а залежність λ ~ f (T) носить нелінійний характер.

Коефіцієнт теплопровідности (λ) стопів титану: ОТ4-0 (Ti + 0,8%Al + 0,8%Mn), ОТ4-1

(Ti + 1,5%Al + 1,0%Mn), ОТ4-2 (TI + 6%Al + 1,5%Mn), а також ВТ 23 (Ti + 4,5%Al + 2%Mo + 4,5%V + 0,6%Fe + 1%Cr), ВТ 20 (Ti + 6%Al + 2%Zr + 1%Mo + 1%V), ВТ 16 (Ti + 2,5%Al + 5%Mo + 5%V) та ВТ14 (Ti + 4,5%Al + 3%Mo + 1%V) теж збільшується зі зростанням температури. За температури 673 К коефіцієнт теплопровідности для стопів ОТ4-1, ОТ4-2 однаковий. Для стопу ВТ 23 та стопу ВТ 16 значення λ дещо вищі. Залежність описується лінійним рівнянням.

Коефіцієнт теплопровідности (λ) нержавіючих, термостійких і термоміцних сталей австенітного класу марки: Х18Н9Т (1Х18Н9Т, ЭЯ1Т), Х17Н13М2Т (ОХ18Н12М2Т, ЭИ448) зі зростанням температури збільшується. Для стопу марки Х17Н13М2Т (ОХ18Н12М2Т, ЭИ448) спостерігається незначне збільшення коефіцієнта теплопровідности.

На відміну від попередніх випадків, коефіцієнт теплопровідности (λ) нелеґованих, низько- та середньолеґованих криць (сталей) перлітного класу марки: сталь Ст 20, сталь У 8, сталь 45 з підвищенням температури зменшується.

2.3. Залежність коефіцієнта теплопровідности від температури (реґресійна аналіза).

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

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{àä.}}}{SS_{\{y\}}}, \qquad (25)$$

де $SS_{\text{àä.}}$ – сума квадратів під час розрахунку дисперсії адекватности;

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

$$0 \le R^2 \le 1. \qquad (26)$$

Результати реґресійної аналізи зведено у табл. 1 для металів та у табл. 2 для стопів. Як видно з табл. 1, у більшости металів для залежностей λ ~ f (T) існує надійний зв'язок при апроксимації як поліномом першого порядку, так і поліномом другого порядку, окрім кобальту, для якого залежність апроксимується лише поліномом другого порядку та Ag, Au, Mg, Zn, V, Nb, Ta і Pt – для яких залежність λ ~ f (T) апроксимується поліномом першого порядку.

Як видно з табл. 2, у більшости стопів для залежностей λ ~ f (T) існує надійний зв'язок при апроксимації поліномом першого порядку (окрім, стопу Cu+1,5%Be, залежність λ ~ f (T) якого апроксимується поліномом другого порядку)

2.4. Залежність коефіцієнта теплопровідности від радіусу атома первня та його порядкового номера в Періодичній системі первнів (кореляційна аналіза).

У табл.3 зведено значення коефіцієнта теплопровідности за температури 100, 200; 273; 300 та 900 К, а також порядковий номер Z та радіус атома r_A для 35 металів [1].

На рис. 5–9 приведено залежности коефіцієнта теплопровідности 35 металів [1] від порядкового номера (Z) та радіусу атома (r_A) за температури 100, 200; 273; 300 та 900 К.

У табл. 4. зведено результати перевірки нульової гіпотези H_0 рівности нулю ґенерального коефіцієнта кореляції залежностей λ = *f*(Z) та λ = *f* (r_A). Як видно з табл. 4, ступінь лінійности для кореляційного зв'язку «коефіцієнт теплопровідности λ від порядкового номера первня Z у Періодичній системі первнів» складає:

- для α = 0,05 ξ_2(r) = 0,04 − 0,72; ξ_2(t) = 0,03 − 0,65; ξ_2(Ż) = 0,03 − 0,68 (для всіх температур);
- для α = 0,01 ξ_2(r) = 0,03 − 0,58; ξ_2(t) = 0,02 − 0,46; ξ_2(Ż) = 0,03 − 0,52 (для всіх температур),

а ступінь нелінійности у цьому зв'язку складає:

- для α = 0,05 ξ_1(r) = 1,39 − 28,4; ξ_1(t) = 1,53 − 30,52; ξ_1(Ż) = 1,47 − 28,49 (для всіх температур);

для α = 0,01 ξ_1(r) = 1,72 − 36,45; ξ_1(t) = 2,16 − 41,13; ξ_1(Ż) = 1,94 − 37,51 (для всіх температур).

І, навпаки, для кореляційного зв'язку «коефіцієнт теплопровідности λ від радіусу атома r_A» ступінь лінійности дорівнює:

- для α = 0,05 ξ_2(r) = 0,14 − 0,64; ξ_2(t) = 0,12 − 0,61; ξ_2(Ż) = 0,13 − 0,62 (для всіх температур);
- для α = 0,01 ξ_2(r) = 0,12 − 0,50; ξ_2(t) = 0,09 − 0,45; ξ_2(Ż) = 0,10 − 0,47 (для всіх температур),

а ступінь нелінійности у цьому зв'язку складає: ξ_1(r) = 1,57 − 6,97; ξ_1(t) = 1,64 − 8,34; ξ_1(Z) = 1,61 − 7,80 (для α = 0,05) та ξ_1(r) = 2,02

Таблиця 1

Лінійна та поліномінальна моделі залежности коефіцієнта теплопровідности металів від температури

Радіус атома, нм	Метал	$y = ax + b$	R^2	$y = ax^2 + bx + c$ або $y = ax^{-b}$	R^2
0,157	Li	$y = -0{,}132x + 119{,}31$	0,8904	$y = 0{,}0005x^2 - 0{,}3915x + 146{,}56$	0,9937
0,191	Na	$y = -0{,}0429x + 141{,}94$	0,3954	$y = -0{,}0006x^2 + 0{,}2608x + 110{,}94$	0,9615
0,235	K	$y = -0{,}03x + 110{,}54$	0,7947	$y = -0{,}0001x^2 + 0{,}0289x + 105{,}13$	0,8850
0,25	Rb	$y = -0{,}0097x + 61{,}035$	0,9610	$y = 3\cdot10^{-5}x^2 - 0{,}0224x + 62{,}184$	0,9915
0,128	Cu	$y = -0{,}1034x + 447{,}68$	0,8573	$y = 4\cdot10^{-5}x^2 - 0{,}1503x + 457{,}24$	0,8667
0,144	Ag	$y = -0{,}0602x + 441{,}61$	0,9279		
0,146	Au	$y = -0{,}1165x + 351{,}83$	0,9465		
0,16	Mg	$y = -0{,}0833x + 182{,}51$	0,9446		
0,138	Zn	$y = -0{,}0906x + 155{,}14$	0,9870		
0,143	Al	$y = -0{,}2518x + 295{,}12$	0,7412	$y = 0{,}0023x^2 - 1{,}1749x + 381{,}27$	0,9198
0,166	In	$y = -0{,}4584x + 166{,}24$	0,9535	$y = -0{,}0018x^2 + 0{,}2954x + 97{,}449$	0,9996
0,171	Tl	$y = -0{,}08x + 71{,}161$	0,9986	$y = -2\cdot10^{-5}x^2 - 0{,}0717x + 70{,}407$	0,9988
0,147	Ti	$y = 0{,}0092x + 17{,}521$	0,7924	$y = -9\cdot10^{-5}x^2 + 0{,}044x + 14{,}43$	0,9826
0,134	V	$y = 0{,}0078x + 30{,}836$	0,9913		
0,146	Nb	$y = 0{,}0207x + 46{,}506$	0,9975		
0,149	Ta	$y = 0{,}0153x + 58{,}155$	0,9774		
0,13	Cr	$y = -0{,}0526x + 114{,}82$	0,8402	$y = 5\cdot10^{-5}x^2 - 0{,}1225x + 130{,}1$	0,9320
0,139	Mo	$y = -0{,}0389x + 186{,}64$	0,9052	$y = -2\cdot10^{-6}x^2 - 0{,}0327x + 184{,}05$	0,9066
0,141	W	$y = -0{,}0157x + 134{,}24$	0,9985	$y = 2\cdot10^{-7}x^2 - 0{,}0161x + 134{,}41$	0,9985
0,126	Fe	$y = -0{,}0444x + 88{,}503$	0,8597	$y = 767{,}88x^{-0{,}4159}$	0,9611
0,125	Co			$y = -0{,}0002x^2 + 0{,}2649x + 15{,}112$	0,9781
0,124	Ni	$y = -0{,}0426x + 105{,}77$	0,7363	$y = 653{,}08x^{-0{,}3458}$	0,9732
0,139	Pt	$y = -0{,}0049x + 73{,}359$	0,9705		

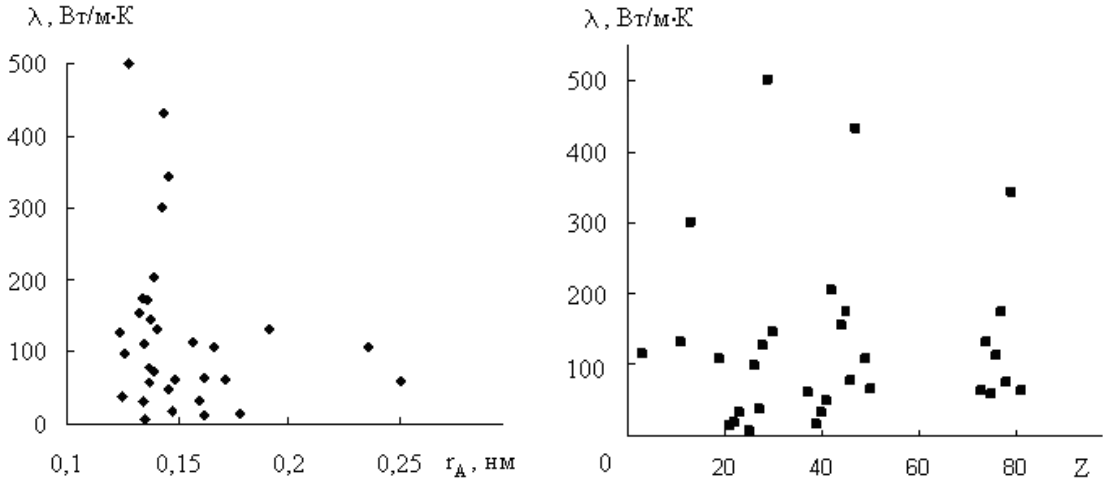

Рис. 5. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідности від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 100 К.

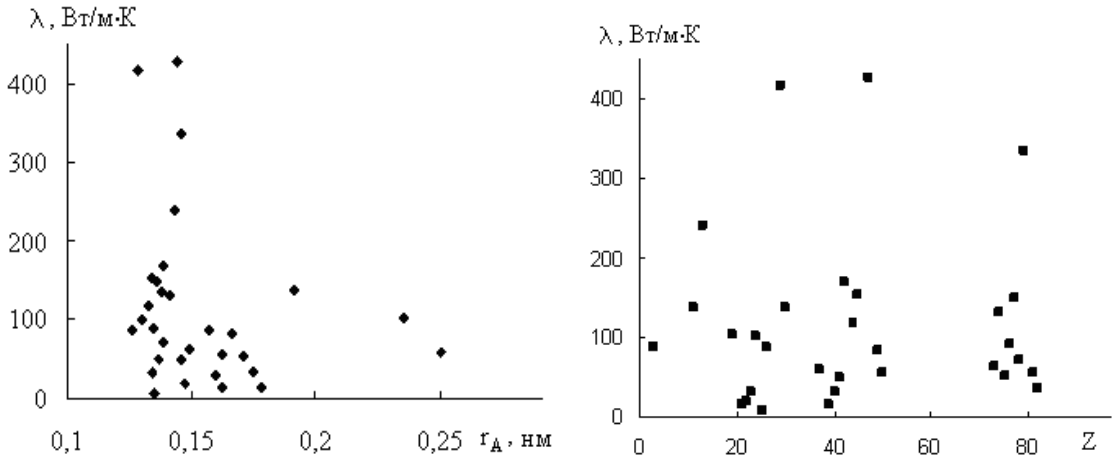

Рис. 6. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідности від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 200 К.

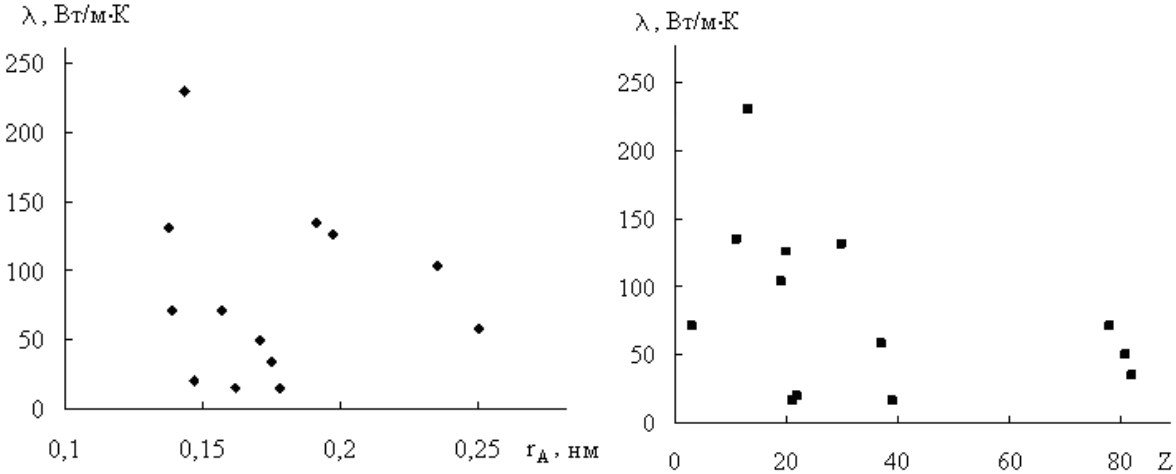

Рис. 7. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідности від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 273 К.

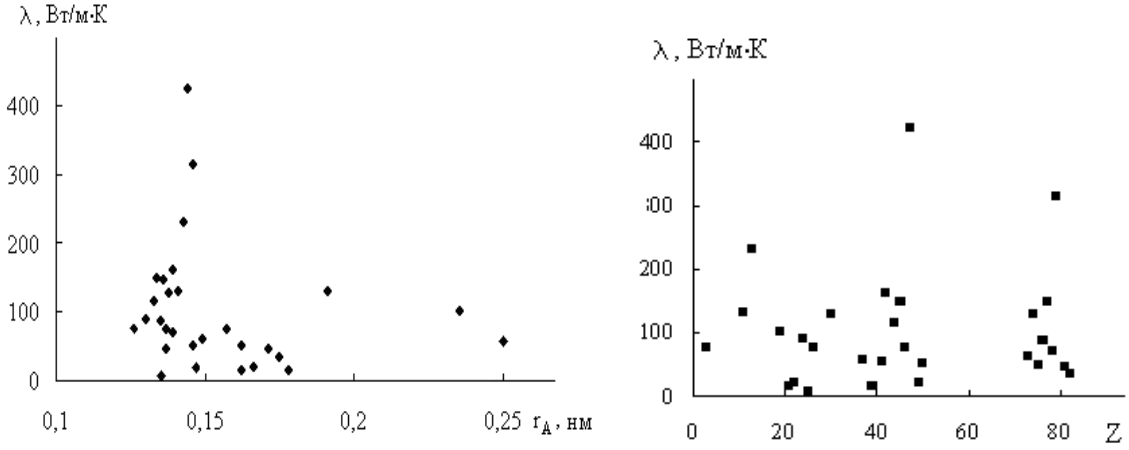

Рис. 8. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідности від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 300 К.

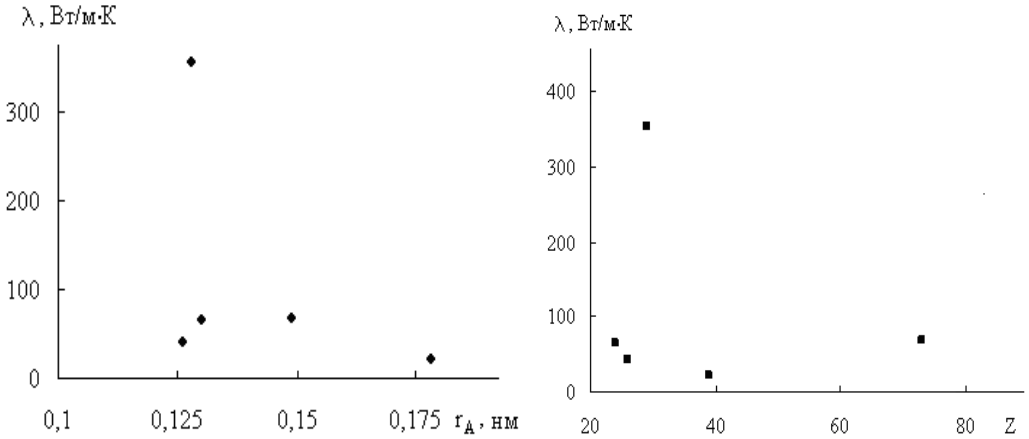

Рис. 9. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідности від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 900 К.

Таблиця 2

Математичні моделі залежностей теплопровідности стопів від температури

Стопи	Рівняння апроксимації	R^2
Cu + 1,5% Be	$y = -0{,}0011x^2 + 0{,}8883x + 0{,}1693$	0,9995
Латунь Л68	y = 0,1593x + 57,286	0,9993
Латунь ЛАН 59-3-2	y = 0,0617x + 75	0,8031
Латунь Л62	y = 0,1157x + 50,714	0,9932
Бронза Бр0Ф10-1	y = 0,0307x + 26,286	0,959
Бронза Бр0Ц10-2	y = 0,0404x + 42,357	0,9709
Бронза Бр0С5-25	y = 0,0457x + 46,571	0,9561
Бронза Бр0Ц6-6-3	y = 0,0489x + 51,357	0,978
Бронза Бр0Ц8-4	y = 0,0514x + 55,571	0,9722
Бронза Бр0Ц4-3	y = 0,0668x + 66,214	0,9869
Бронза БрА7	y = 0,0739x + 76,071	0,9939
Бронза БрА-5	y = 0,0818x + 82,071	0,9905
ОТ4-0	y = 0,0112x + 6,1323	0,987
ОТ4-1	y = 0,0087x + 9,6805	0,988
ОТ4-2	y = 0,0155x + 2,7449	0,9925
ВТ 23	y = 0,0128x + 4,7753	0,9917
ВТ 20	y = 0,0137x + 3,369	0,9949
ВТ 16	y = 0,0147x + 4,3798	0,9882
ВТ 14	y = 0,0145x + 3,0002	0,9821
Сталь Ст 20	y = -0,0335x + 67,66	0,9949
Сталь У 8	y = -0,027x + 57,321	0,9782
Сталь Ст 45	y = -0,0271x + 57,252	0,9863
Х18Н9Т (1Х18Н9Т, ЭЯ1Т)	y = 0,0125x + 11,242	0,9864
Х17Н13М2Т (ОХ18Н12М2Т, ЭИ448)	y = 0,003x + 13,879	0,9359

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта теплопровідности металів та стопів від температури, радіусу атомів та порядкового номера в Періодичній системі первнів

Метал	Порядковий номер, Z	Радіус атома r_A, нм	λ, Вт/м·К				
			100 К	200 К	273 К	300 К	900 К
Li	3	0,157	114	88,1	71,2	76,8	–
Na	11	0,191	132	138	135	132	–
K	19	0,235	107	104	104	102	–
Rb	37	0,25	60,3	58,9	58,3	58,2	–
Cu	29	0,128	500	417	–	–	354
Ag	47	0,144	431	427	–	423	–
Au	79	0,146	343	335	–	314	–
Ca	20	0,197	–	–	126	–	–
Zn	30	0,138	145	137	131	128	–
Al	13	0,143	300	240	230	230	–
In	49	0,166	108	83	–	21	–
Tl	81	0,171	63	55	49,6	47	–
Sc	21	0,162	14,3	15,3	15,7	15,8	–
Y	39	0,178	15,7	15,8	16	16,2	22,6
Ti	22	0,147	18	20	20	20	–
Zr	40	0,16	33,5	31,8	–	–	–
Sn	50	0,162	66	56,7	–	51,5	–
Pb	82	0,175	–	35	34,9	34,9	–
V	23	0,134	32,1	32,6	–	–	–
Nb	41	0,146	49	50	–	53	–
Ta	73	0,149	63	63	–	63	69,5
Cr	24	0,13	–	102	–	90	66
Mo	42	0,139	205	169	–	162	–
W	74	0,141	132	131	–	130	–
Mn	25	0,132	6	7,2	–	7,8	–
Fe	26	0,126	98	87	–	77	42
Co	27	0,125	37,5	–	–	–	–
Ni	28	0,124	127	–	–	–	–
Pt	78	0,139	74	71,9	71,4	71,2	–
Re	75	0,137	58,6	51,5	–	48,1	–
Ru	44	0,133	154	118	–	117	–
Rh	45	0,134	174	153	–	150	124
Pd	46	0,137	78,6	–	–	75,7	75,5
Os	76	0,135	113	90,8	–	87,6	–
Ir	77	0,136	173	150	–	148	–

Таблиця 4

Результати перевірки нульової гіпотези рівности нулю ґенерального коефіцієнта кореляції зв'язків λ ~ Z, λ ~ r_A за його критичним значенням ($r_{кр.}$), критерієм Стьюдента (t_T) та перетворенням Фішера (z_T)

Зв'язки між величинами		Рівні значущости	λ, Вт/м·К				
			100 К	200 К	273 К	300 К	900 К
Кореляційний зв'язок:			Розрахунковий коефіцієнт кореляції (r_p)				
λ ~ Z			0,0413	0,0125	−0,3978	0,0621	−0,2095
λ ~ r_A			−0,2039	−0,2258	−0,0793	−0,1791	−0,4186
N			32	31	13	29	7
f = N−2			30	29	11	27	5
			Критичний коефіцієнт кореляції				
$r_{кр.}$ {q = $1-\frac{a}{2}$; f =N−2}		α = 0,05	0,3494	0,3550	0,5529	0,3673	0,7545
		α = 0,01	0,4488	0,4556	0,6835	0,4705	0,8745
λ ~ Z	ξ_1 (r)	α = 0,05	8,460	28,400	1,390	5,915	3,601
	ξ_2 (r)		0,118	0,035	0,719	0,169	0,278
	ξ_1 (r)	α = 0,01	10,867	36,448	1,718	7,576	4,174
	ξ_2 (r)		0,092	0,027	0,582	0,132	0,240
λ ~ r_A	ξ_1 (r)	α = 0,05	1,714	1,572	6,972	2,051	1,802
	ξ_2 (r)		0,584	0,636	0,143	0,488	0,555
	ξ_1 (r)	α = 0,01	2,201	2,018	8,619	2,627	2,089
	ξ_2 (r)		0,454	0,496	0,116	0,381	0,479
Кореляційний зв'язок:			Статистика Стьюдента (t_p)				
λ ~ Z			0,226	0,067	−1,438	0,323	−0,479
λ ~ r_A			−1,141	−1,248	−0,264	−0,946	−1,031
t_T {q = $1-\frac{a}{2}$; f = N−2}		α = 0,05	2,042	2,045	2,201	2,052	2,571
		α = 0,01	2,750	2,756	3,106	2,771	4,032
λ ~ Z	ξ_1 (t)	α = 0,05	9,035	30,522	1,531	6,353	5,367
	ξ_2 (t)		0,111	0,033	0,653	0,157	0,186
	ξ_1 (t)	α = 0,01	12,168	41,134	2,160	8,579	8,418
	ξ_2 (t)		0,082	0,024	0,463	0,117	0,119
λ ~ r_A	ξ_1 (t)	α = 0,05	1,790	1,639	8,337	2,169	2,494
	ξ_2 (t)		0,559	0,610	0,120	0,461	0,401
	ξ_1 (t)	α = 0,01	2,410	2,208	11,765	2,929	3,911
	ξ_2 (t)		0,415	0,453	0,085	0,341	0,256
Кореляційний зв'язок:			Статистика перетворення Фішера (z_p)				
λ ~ Z			0,0413	0,0125	−0,4210	0,0622	−0,2126
λ ~ r_A			−0,2068	−0,2298	−0,0795	−0,1811	−0,4460
z_T {q = $1-\frac{a}{2}$}		α = 0,05	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
		α = 0,01	2,58	2,58	2,58	2,58	2,58
s_Z			0,1857	0,1890	0,3162	0,1961	0,5000
($z_T \cdot s_Z$)		α = 0,05	0,3640	0,3704	0,6198	0,3844	0,9800
		α = 0,01	0,4791	0,4876	0,8158	0,5059	1,2900
λ ~ Z	ξ_1 (Ż)	α = 0,05	8,814	29,632	1,472	6,180	4,610
	ξ_2 (Ż)		0,113	0,034	0,679	0,162	0,217
	ξ_1 (Ż)	α = 0,01	11,600	39,008	1,938	8,133	6,068
	ξ_2 (Ż)		0,086	0,026	0,516	0,123	0,165
λ ~ r_A	ξ_1 (Ż)	α = 0,05	1,760	1,612	7,796	2,123	2,197
	ξ_2 (Ż)		0,568	0,620	0,128	0,471	0,455
	ξ_1 (Ż)	α = 0,01	2,316	2,122	10,262	2,793	2,892
	ξ_2 (Ż)		0,432	0,471	0,097	0,358	0,346

− 8,62; $\xi_1(t)$ = 2,21 − 11,77; $\xi_1(Z)$ = 2,12 − 10,26 (для α = 0,01), що дозволяє зробити висновок: узагальнена залежність λ = f (Z) та λ = f (r_A) для 35 металів та інтервалу температур 100−900 К є нелінійною з високим ступенем нелінійности.

Пояснити виявлені властивости можна наступним чином. Під час кристалізації металів (наприклад, у процесі охолоджування 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 кількости дрібних кристаликів – так званих кристалітів, або зерен, які на відміну від чітко оґранених монокристалів інших неорґанічних речовин мають неправильну форму і різну просторову орієнтацію. З цієї причини у кристалічній структурі металів виникають дефекти, які суттєво впливають на фізичні властивости металів.

Висновки

1. За літературними даними досліджено температурну залежність коефіцієнта теплопровідности металів та стопів.

2. Встановлено, що за низьких температур (T≤100 K) коефіцієнт теплопровідности більшости металів інтенсивно зростає до температури піка максимального його значення. З подальшим збільшенням температури коефіцієнт теплопровідности металів різко зменшується.

3. Встановлено, що за високих температур в межах від 50−100 до 300−2500 К коефіцієнт теплопровідности більшости металів із збільшенням температури зменшується (окрім титану та металів VB ґрупи Періодичної системи первнів, коефіцієнт теплопровідности яких із збільшенням температури незначно збільшується).

4. Встановлено, що коефіцієнт теплопровідности для більшости досліджених стопів зростає із збільшенням температури (окрім сталей перлітного класу, коефіцієнт теплопровідности яких із збільшенням температури лінійно зменшується).

5. Отримано апроксимаційні залежности коефіцієнта теплопровідности від температури для 35 металів та стопів. Встановлено, що для залежностей λ~f(T) існує надійний зв'язок апроксимації як поліномом першого порядку, так і поліномом другого порядку. Для більшости стопів залежність λ~f(T) апроксимується поліномом першого порядку (окрім, стопу Cu+1,5%Be, залежність λ~f(T) якого апроксимується поліномом другого порядку).

6. Встановлено за результатами кореляційної аналізи, що між коефіцієнтом теплопровідности і радіусом атомів та порядковим номером металів за температур 100, 200, 273, 300 і 900 К немає лінійного зв'язку. Подано оцінку лінійности та нелінійности; узагальнено залежність λ=f(Z) та λ=f(r_A) для 35 металів та інтервалу температур 100−900 К.

Базюк Л.В. – викладач кафедри неорґанічної та фізичної хімії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорґанічної та фізичної хімії 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.Є. 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. Полторак. *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. Цвєткова. *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. *Теплофізичні властивости металів та стопів: 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 *Теплофізичні властивости металів та стопів: 2. Залежність коефіцієнта теплопровідности від температури та радіусу атомів*. //Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, XIII, сс. 102−121. (2011).

L.V. Bazyuk, H.O. Sirenko

Thermophysical Properties of Metals and Alloys. 2. Coefficient of Thermal Conductivity Dependence from Temperature and Radius of Atoms

Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, e-mail: sirenkog@rambler.ru

The dependence of coefficient of thermal conductivity from temperature, serial number and radius of atom of metals has been analyzed and proved by correlation and regression analysis. It is shown that with increasing temperature for most metals and alloys thermal conductivity decreases. Established that growth between coefficient of thermal conductivity and the radius of metal atoms no linear connection between a metals of periodic elements at temperatures 100, 200, 273, 300 and 900 K is close linear relationship.

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