

УДК 536 + 539.2

Л.В. Базюк, Г.О. Сіренко, Н.І. Бертолон

Теплофізичні властивості металів та сплавів. 2. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури та радіусу атомів

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

За літературними даними вивчено, проаналізовано методами кореляційної та регресійної аналізи та обґрунтовані залежності коефіцієнта теплопровідності від температури, порядкового номера та радіусу атома металів. Показано, що зі зростанням температури для більшості металів та сплавів коефіцієнт теплопровідності зменшується. Встановлено, що між коефіцієнтом теплопровідності і радіусом атомів металів та їх порядковим номером у Періодичній системі первнів існує нелінійний зв'язок.

Ключові слова: метали, сплави, коефіцієнт теплопровідності, теплофізичні властивості, радіус атома металів, кореляційна аналіза, регресійна аналіза.

L. V. Bazyuk, H. O. Sirenko, N. I. Bertolon

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*

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.

Стаття постуила до редакції 07.03.2011; прийнята до друку 20.04.2011.

Вступ

Відомо [1–28], що коефіцієнт теплопровідності (λ) залежить від температури (T), але відсутні: ретельний аналіз цієї залежності для металів та сплавів, не приведені апроксимаційні функції, що описують ці залежності та не виявлений кореляційний зв'язок між коефіцієнтом

теплопровідності та температурою, порядковим номером і радіусом атома первня Періодичної таблиці. **Метою роботи** є дослідження залежності коефіцієнта теплопровідності від температури, радіусу та порядкового номера атомів металів Періодичної системи первнів і сплавів та пошуку кореляційних зв'язків і апроксимаційних математичних моделей між цими характеристиками.

I. Експериментальна частина

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

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

та альтернативну гіпотезу

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

де вибірковий коефіцієнт кореляції був статистичною оцінкою генерального коефіцієнта кореляції:

$$r_p \rightarrow \rho.$$

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

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

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

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

$$|r_p| < r_{кр.}, \quad (4)$$

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

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

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

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

У разі виконання нерівності:

$$|r_p| \geq r_{кр.}, \quad (7)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

У разі виконання нерівності:

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

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

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

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

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

3. За перетворенням Фішера [30]:

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

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

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

У разі виконання нерівності:

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

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

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

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

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

У разі виконання нерівности:

$$|z_P| \geq (z_T \cdot \sigma_Z), \quad (22)$$

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

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

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

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

II. Результати та обговорення

2.1. Залежність коефіцієнта теплопровідности металів від температури за низьких температур ($T \leq 100$ К).

1. На рис. 1 а, б приведено залежності коефіцієнта теплопровідности (λ) металів ІА групи Періодичної системи первнів від температури (T) в інтервалі температур 0–50 К. Як видно з рис. 1а, коефіцієнт теплопровідности натрію (крива 1) та калію (крива 2) зростає від $\lambda = 3180$ до $\lambda = 4820$ Вт/м·К (для натрію) та від $\lambda \approx 1200$ до $\lambda = 1960$ Вт/м·К (для калію) із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення ($T_{\max} = 5$ К для натрію та $T_{\max} = 3$ К для калію). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідности різко спадає від $\lambda = 4820$ до $\lambda = 120$ Вт/м·К (для натрію) та від $\lambda \approx 1960$ до $\lambda = 98,5$ Вт/м·К (для калію) під час збільшення температури від T_{\max} до 20–50 К. Як видно з рис. 1б, коефіцієнт теплопровідности літію (крива 3) інтенсивно зростає від $\lambda = 197$ до $\lambda = 720$ Вт/м·К, в той час як коефіцієнт теплопровідности рубідію (крива 4) незначно змінюється від $\lambda = 127$ до $\lambda = 188$ Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення ($T_{\max} = 26$ К для літію та $T_{\max} = 6$ К для рубідію). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідности літію різко спадає від $\lambda = 720$ до $\lambda = 72,1$ Вт/м·К та незначно змінюється від $\lambda \approx 188$ до $\lambda = 58,1$ Вт/м·К

(для рубідію) під час збільшення температури від T_{\max} до 50 К.

2. На рис. 2 приведено залежність коефіцієнта теплопровідности (λ) міді, срібла та золота від температури (T) в інтервалі температур 0–50 К. Як видно з рис. 2, для золота (крива 3) спостерігається незначне зростання коефіцієнта теплопровідности від $\lambda \approx 200$ до $\lambda = 800$ Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до $T_{\max} = 20$ К. З подальшим підвищенням температури від $T_{\max} = 20$ К до 50 К коефіцієнт теплопровідности незначно зменшується від $\lambda = 800$ до $\lambda = 439$ Вт/м·К. Для срібла та міді (рис. 2, крива 1 та 2 відповідно) спостерігається значне зростання коефіцієнта теплопровідности від $\lambda = 4800$ до $\lambda = 10600$ Вт/м·К (для срібла) та від $\lambda \approx 500$ до $\lambda = 5000$ Вт/м·К (для міді) із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення ($T_{\max} = 8$ К для срібла та $T_{\max} = 15$ К для міді). З подальшим підвищенням температури від T_{\max} до 50 К коефіцієнт теплопровідности різко зменшується від $\lambda = 10600$ до $\lambda = 700$ Вт/м·К (для срібла) та від $\lambda \approx 5000$ до $\lambda = 1500$ Вт/м·К (для міді).

3. На рис. 3 приведено залежність коефіцієнта теплопровідности (λ) магнію від температури (T) в інтервалі температур 0–50 К. Як видно з рис. 3, коефіцієнт теплопровідности магнію різко зростає від $\lambda \approx 0$ до $\lambda = 1212$ Вт/м·К із збільшенням температури від $\sim 0,5$ К до $T_{\max} \approx 23$ К. З подальшим підвищенням температури від $T_{\max} \approx 23$ К до 50 К коефіцієнт теплопровідности різко зменшується від $\lambda = 1212$ до $\lambda \approx 200$ Вт/м·К.

4. На рис. 4 приведено залежність коефіцієнта теплопровідности (λ) алюмінію та індію від температури (T) в інтервалі температур 0–100 К. Як видно з рис. 4, коефіцієнт теплопровідности алюмінію (крива 1) інтенсивно зростає від $\lambda = 2200$ до $\lambda = 5200$ Вт/м·К, в той же час як коефіцієнт теплопровідности індію (крива 2) незначно змінюється від $\lambda = 520$ до $\lambda = 800$ Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення ($T_{\max} \approx 12$ К для алюмінію та $T_{\max} = 5$ К для індію). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідности алюмінію різко спадає від $\lambda = 5200$ до $\lambda = 300$ Вт/м·К та незначно зменшується від $\lambda \approx 800$ до $\lambda = 108$ Вт/м·К (для індію) під час збільшення температури від T_{\max} до 80–100 К.

5. На рис. 5 приведено залежність коефіцієнта теплопровідности (λ) титану від температури (T) в інтервалі температур 0–100 К. Як видно з рис. 5, зі збільшенням температури від 0 до 50 К коефіцієнт теплопровідности титану інтенсивно зростає від $\lambda \approx 0$ до $\lambda = 14$ Вт/м·К. Подальше підвищення температури від 50 до 100 К приводить до незначного зростання коефіцієнта теплопровідности титану від $\lambda \approx 14$ до $\lambda = 18$ Вт/м·К. Таке зростання коефіцієнта теплопровідности титану в даному інтервалі температур можна пояснити його особливими властивостями.

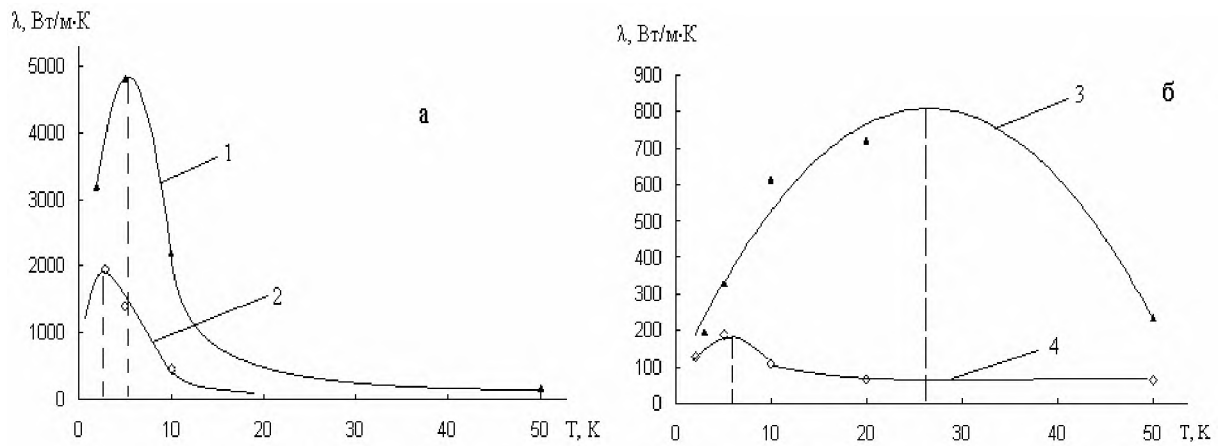


Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: а) натрію (1) і калію (2); б) літію (3) і рубідію (4).

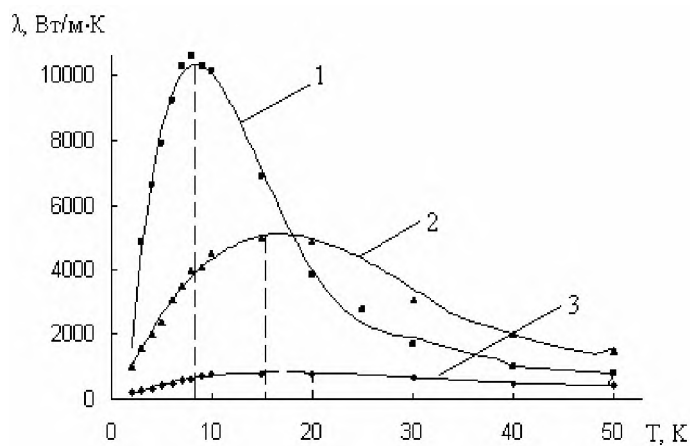


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: срібла (1), міді (2) та золота (3).

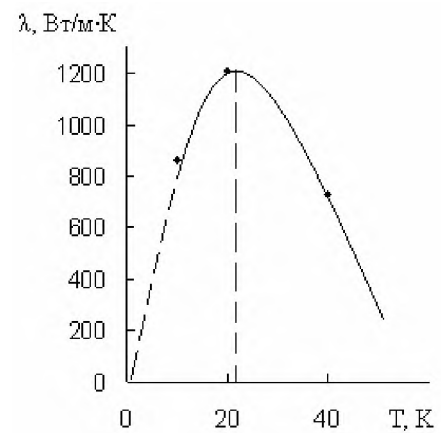


Рис. 3. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності магнію.

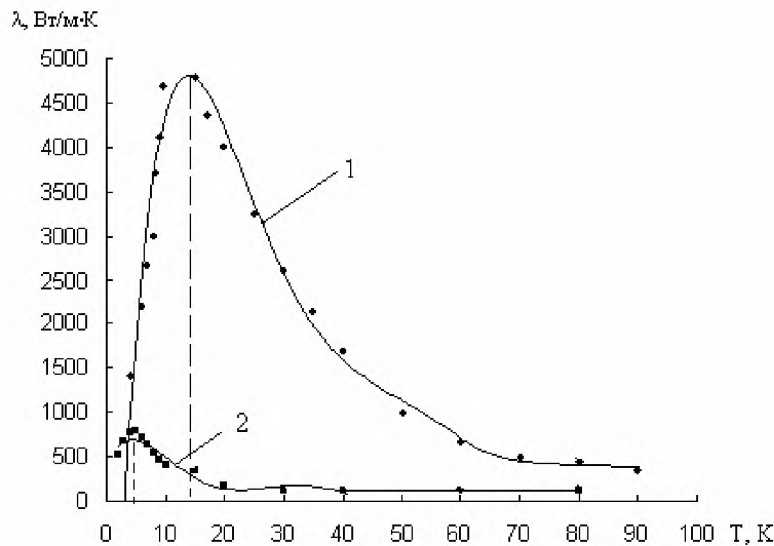


Рис. 4. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: алюмінію (1); індію (2).

6. На рис. 6 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) металів побічної підгрупи VI групи Періодичної системи первнів – хрому, молібдену та вольфраму – від температури (T) в інтервалі температур 0–100 К. Як видно з рис. 6, для хрому (крива 1) спостерігається значне

зростання коефіцієнта теплопровідності від $\lambda \approx 0$ до $\lambda = 553$ Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до $T_{\max} = 25$ К. З подальшим підвищенням температури від $T_{\max} = 25$ К до 90 К коефіцієнт теплопровідності зменшується від $\lambda = 553$ до $\lambda = 143$ Вт/м·К. Для молібдену та вольфраму (рис. 6,

крива 2 та 3 відповідно) спостерігається значно менше зростання коефіцієнта теплопровідності від $\lambda = 30$ до $\lambda = 360$ Вт/м·К (для молібдену) та від $\lambda = 38$ до $\lambda = 340$ Вт/м·К (для вольфраму) із збільшенням температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення ($T_{\max} \approx 30\text{--}45$ К для молібдену та $T_{\max} = 28\text{--}40$ К для вольфраму). З подальшим підвищенням температури від T_{\max} до 100 К коефіцієнт теплопровідності незначно зменшується від $\lambda = 360$ до $\lambda = 205$ Вт/м·К (для молібдену) та від $\lambda \approx 340$ до $\lambda = 132$ Вт/м·К (для вольфраму).

7. На рис. 7 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) заліза та ніколу від температури (T) в інтервалі температур 0–100 К. Як видно з рис. 7, коефіцієнт теплопровідності заліза (крива 1) інтенсивно зростає від $\lambda = 293$ до $\lambda = 873$ Вт/м·К, в той час як коефіцієнт теплопровідності ніколу (крива 2) незначно змінюється від $\lambda = 59$ до $\lambda = 251$ Вт/м·К із збільшенням

температури від ~ 0 К до температури піка максимального його значення ($T_{\max} \approx 20$ К для заліза та $T_{\max} = 35$ К для ніколу). Після піку максимуму коефіцієнт теплопровідності заліза різко спадає від $\lambda = 873$ до $\lambda = 98$ Вт/м·К та незначно зменшується від $\lambda \approx 251$ до $\lambda = 127$ Вт/м·К (для ніколу) під час збільшення температури від T_{\max} до 100 К.

8. На рис. 8 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) платини від температури (T) в інтервалі температур 0–100 К. Як видно з рис. 8, коефіцієнт теплопровідності платини різко зростає від $\lambda = 350$ до $\lambda = 1300$ Вт/м·К із збільшенням температури від ~ 0 К до $T_{\max} \approx 6$ К. З подальшим підвищенням температури від $T_{\max} \approx 6$ К до 35 К коефіцієнт теплопровідності різко зменшується від $\lambda = 1300$ до $\lambda \approx 200$ Вт/м·К, а в інтервалі температур 35 – 100 К спостерігається незначне зменшення коефіцієнта теплопровідності від $\lambda = 200$ до $\lambda \approx 74$ Вт/м·К.

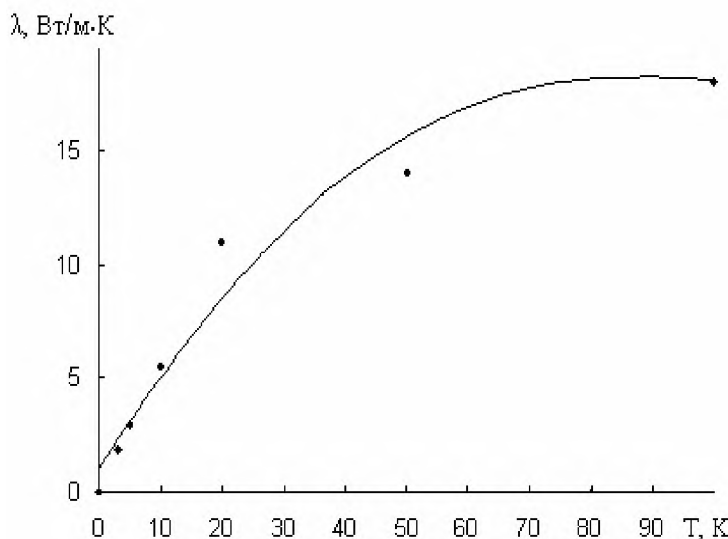


Рис. 5. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності титану.

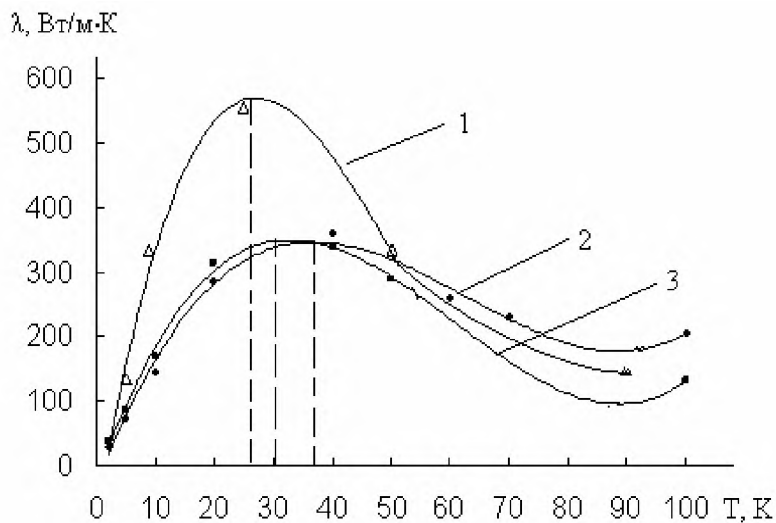


Рис. 6. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: хрому (1), молібдену (2) та вольфраму (3).

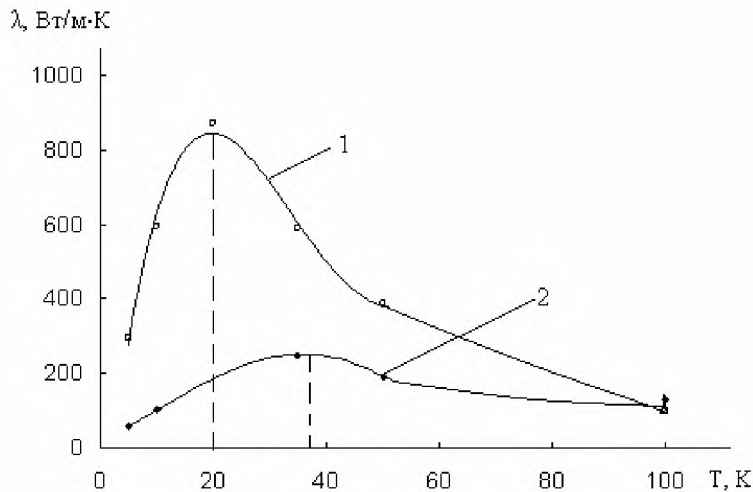


Рис. 7. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: заліза (1) та нікелю (2).

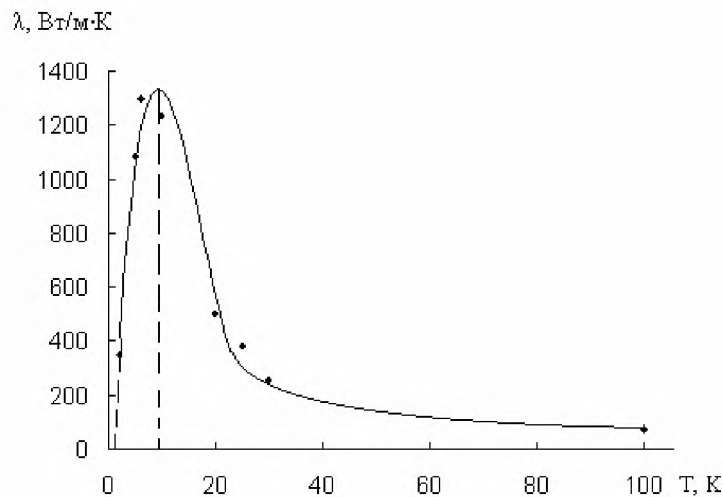


Рис. 8. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності платини.

2.2. Залежність коефіцієнта теплопровідності металів від температури за високих температур у межах від 50–100 до 300–2500 К.

За даними [1] побудовано температурні залежності металів відносно λ за високих температур ($T \geq 50$ К).

1. На рис. 9. приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) лужних металів Періодичної системи первнів від температури (Т). Як видно з рис. 9, із збільшенням температури від $T = 50$ до $T = 400$ К коефіцієнт теплопровідності всіх лужних металів незначно зменшується: літій (криві 1, 1') від $\lambda = 235$ до $\lambda = 72,1$ Вт/м·К, натрію (крива 2) від $\lambda = 158$ до $\lambda = 120$ Вт/м·К, калію (крива 3) $\lambda = 112$ до $\lambda = 98,5$ Вт/м·К, рубідію (крива 4) $\lambda = 62,7$ до $\lambda = 58,1$ Вт/м·К і не залежить від порядкового номера (Z) первня.

2. На рис. 10 приведено залежність теплопровідності (λ) металів побічної підгрупи I групи Періодичної системи первнів від температури (Т). Як видно з рис. 10, коефіцієнт теплопровідності металів: міді (крива 1), срібла (крива 2), золота (крива 3) зі збільшенням температури від $T = 100$

до $T = 1300$ К лінійно зменшується від $\lambda = 500$ до $\lambda = 320$ Вт/м·К (для міді), від $\lambda = 431$ до $\lambda = 381$ Вт/м·К (для срібла) та від $\lambda = 343$ до $\lambda = 247$ Вт/м·К (для золота) і не залежить від порядкового номера первня відповідного металу.

3. На рис. 11. приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) металів II групи Періодичної системи первнів: магнію (рис. 3а) та цинку (рис. 3б) від температури (Т). Як видно з рис. 11, зі збільшенням температури від $T = 173$ до $T = 1173$ К (для магнію) та від $T = 100$ до $T = 300$ К (для цинку) коефіцієнт теплопровідності магнію (рис. 11а) та цинку (рис. 11б) зменшується від $\lambda = 179$ до $\lambda = 98$ Вт/м·К (для магнію) та від $\lambda = 145$ до $\lambda = 128$ Вт/м·К (для цинку), а залежність $\lambda \sim f(T)$ носить лінійний характер.

4. На рис. 12. приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) берилію від температури (Т). Зі зростанням температури від ~ 0 до 1600 К коефіцієнт теплопровідності лінійно зменшується. Найнижчі значення коефіцієнта теплопровідності берилію спостерігаються у холоднопресованого спеченого, а найвищі – гарячопресованого.

ваного спеченого.

5. На рис. 13 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) металів IIIA групи Періодичної системи первнів: алюмінію (Al), індію (In), талію (Tl) – від температури (T). Для Al та In, як і в попередніх випадках, з підвищенням температури від 100 до 300 К зменшується коефіцієнт теплопровідності від $\lambda = 300$ до $\lambda = 230$ Вт/м·К (для алюмінію) та від $\lambda = 108$ до $\lambda = 21$ Вт/м·К (для індію), в той час як для талію значення коефіцієнта теплопровідності у всьому діапазоні температур майже не змінюються від $\lambda = 63$ до $\lambda = 47$ Вт/м·К.

6. На рис. 14 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) перехідного металу IV групи Періодичної системи первнів: титану (Ti) від температури (T). Як видно з рис. 14, коефіцієнт теплопровідності цього металу незначно зростає від $\lambda = 18$ до $\lambda = 20$ Вт/м·К з підвищенням температури від 100 до 300 К, що не є характерним для всіх інших металів, а залежність $\lambda \sim f(T)$ носить лінійний характер.

7. На рис. 15 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) металів побічної підгрупи V групи Періодичної системи первнів від

температури (T). Як і в попередньому випадку, з рис. 15 видно, що з підвищенням температури від 100 до 2700 К (для ніобію та танталу) та від 100 до 1773 К (для ванадію) коефіцієнт теплопровідності V (крива 1), Nb (крива 2), Ta (крива 3) незначно зростає від $\lambda = 49$ до $\lambda = 102$ Вт/м·К (для ніобію), від $\lambda = 63$ до $\lambda = 100$ Вт/м·К (для танталу) та від $\lambda = 32,1$ до $\lambda = 65,6$ Вт/м·К (для ванадію), при цьому із зростанням порядкового номера первня коефіцієнт теплопровідності збільшується до температури ~2000 К.

8. На рис. 16 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) металів побічної підгрупи VI групи Періодичної системи первнів від температури (T). Як видно з рис. 16, з підвищенням температури від 100 до 2700 К (для молібдену та вольфраму) та від 100 до 1200 К (для хрому) спостерігається зменшення коефіцієнта теплопровідності металів Cr (крива 1) від $\lambda = 129$ до $\lambda = 60$ Вт/м·К, Mo (крива 2) від $\lambda = 205$ до $\lambda = 68$ Вт/м·К, W (крива 3) від $\lambda = 132$ до $\lambda = 92$ Вт/м·К, при цьому коефіцієнт теплопровідності даних металів не залежить від їх порядкового номера у Періодичній системі первнів.

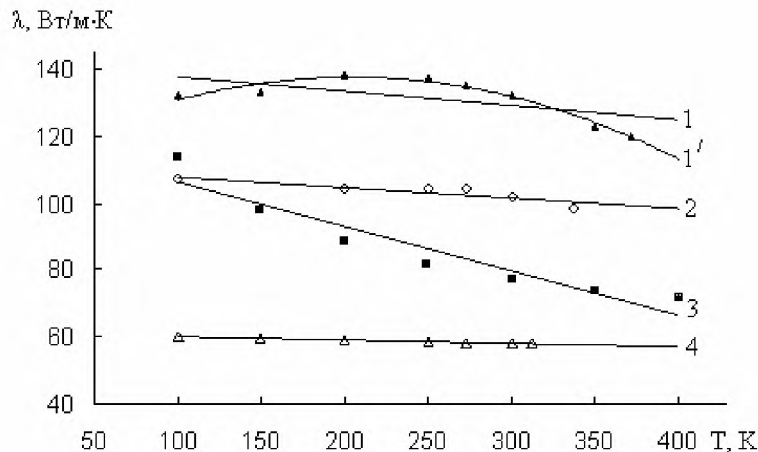


Рис. 9. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: 1, 1' – натрію (Z=11); 2 – калію (Z=19); 3 – літію (Z=3); 4 – рубідію (Z=37).

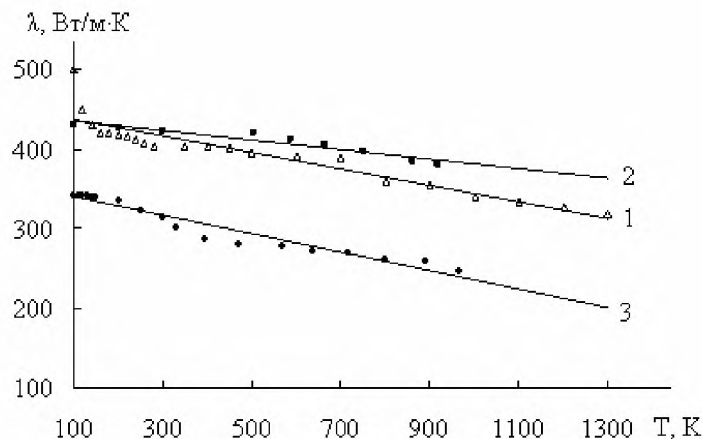


Рис. 10. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: 1 – міді (Z=29); 2 – срібла (Z=47); 3 – золота (Z=79).

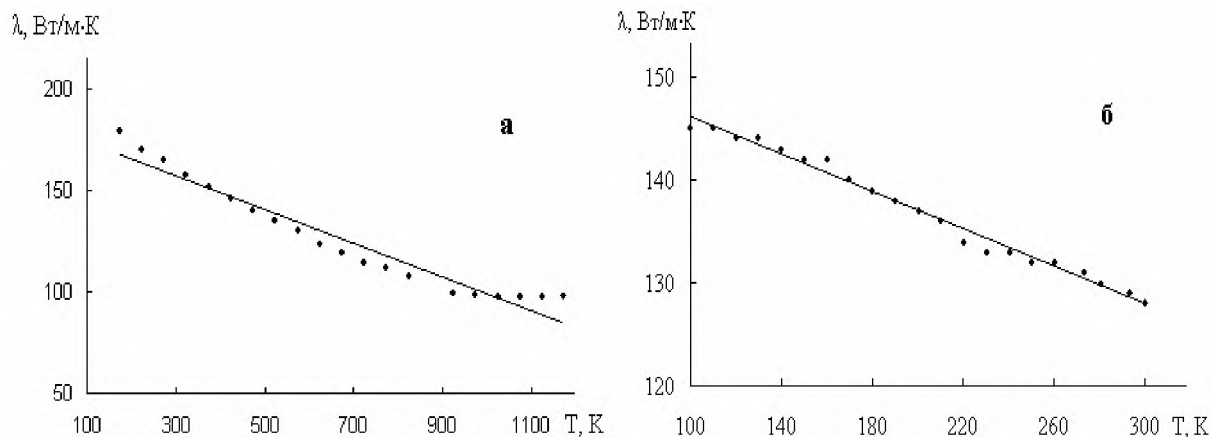


Рис. 11. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: а – магнію ($Z=12$); б – цинку ($Z=30$).

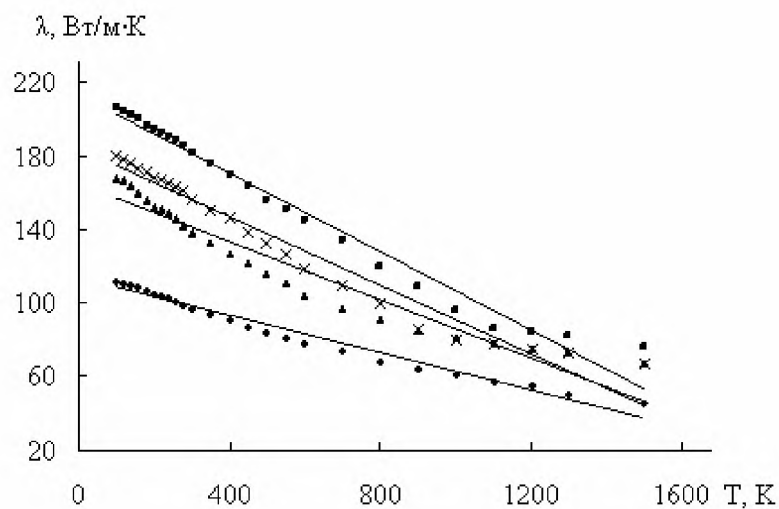


Рис. 12. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності берилію ($Z=4$):

- ◆ – холоднопресований спечений;
- ▲ – холоднопресований спечений, витриманий за температури 1300 К на протязі 1000год.;
- × – гарячопресований спечений, витриманий за температури 1300 К на протязі 1000год.;
- – гарячопресований спечений.

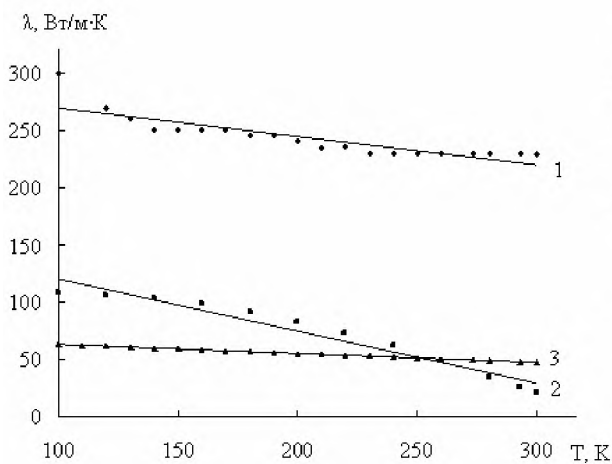


Рис. 13. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності: 1 – алюмінію ($Z=13$); 2 – індію ($Z=49$); 3 – талію ($Z=81$).

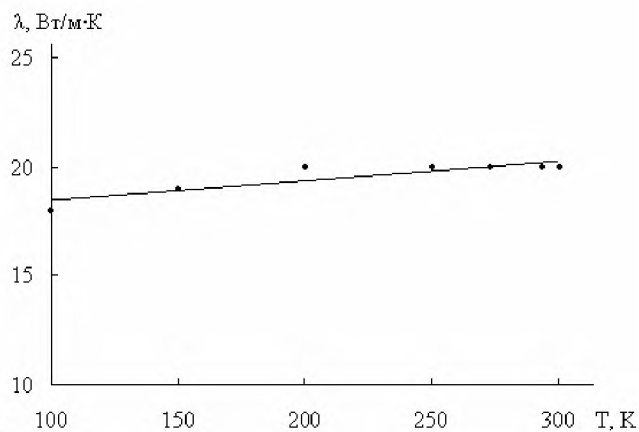


Рис. 14. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності титану ($Z=22$).

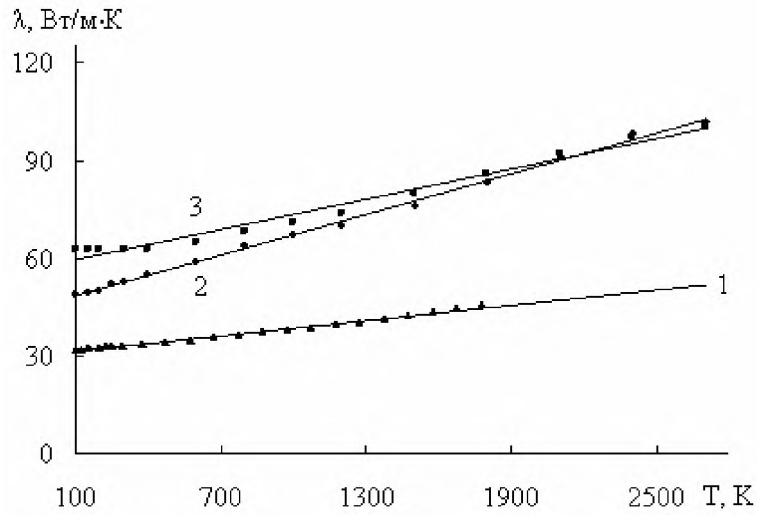


Рис. 15. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності:
1 – ванадію ($Z=23$); 2 – ніобію ($Z=41$); 3 – танталу ($Z=73$).

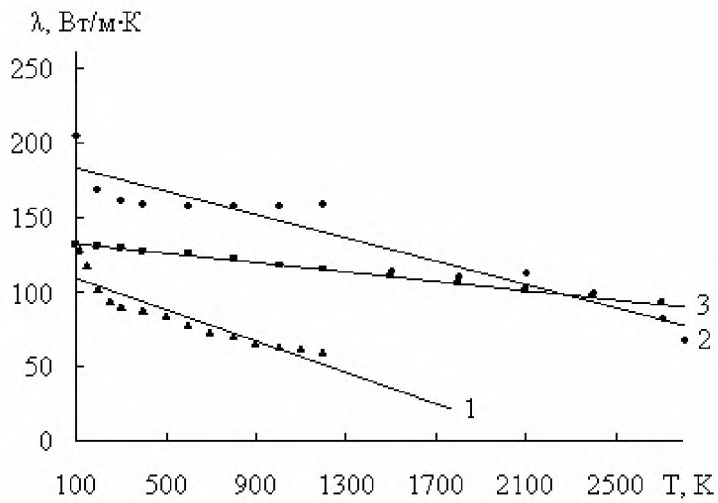


Рис. 16. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності:
1 – хрому ($Z=24$); 2 – молібдену ($Z=42$); 3 – вольфраму ($Z=74$).

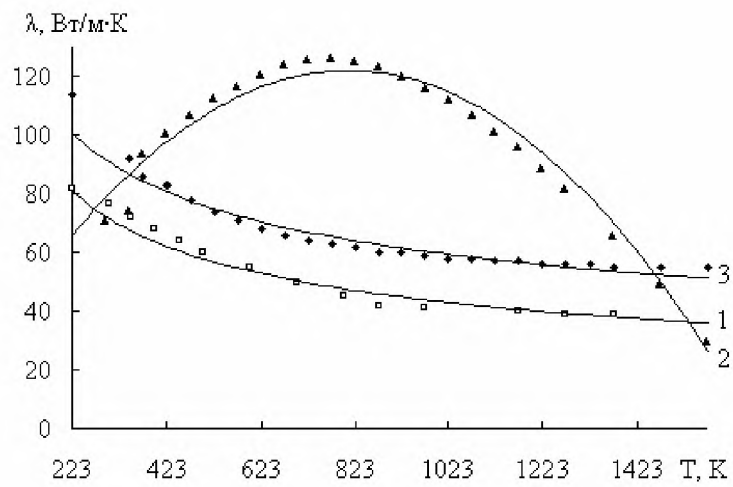


Рис. 17. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності:
1 – заліза ($Z=26$); 2 – кобальту ($Z=27$); 3 – ніколу ($Z=28$).

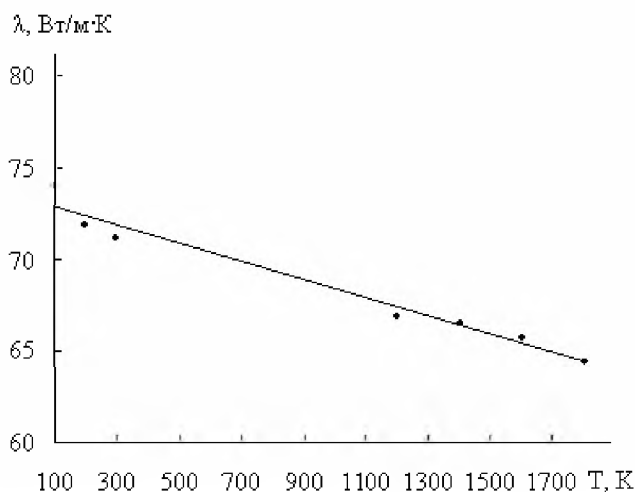


Рис. 18. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності платини ($Z=78$).

9. На рис. 17 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) заліза, ніколу та кобальту від температури (T). Як видно з рис. 17, з підвищенням температури від ~ 220 до 1670 К коефіцієнт теплопровідності металів: заліза (крива 1) та ніколу (крива 3) зменшується від $\lambda = 82$ до $\lambda = 39$ Вт/м·К (для заліза) та від $\lambda = 114$ до $\lambda = 55$ Вт/м·К (для ніколу), хоча й залежність $\lambda \sim f(T)$ носить нелінійний характер. Коефіцієнт теплопровідності кобальту (крива 2) зростає від $\lambda \approx 66$ до $\lambda = 126,8$ Вт/м·К із збільшенням температури від 220 К до $T_{\max} = 770$ К. З подальшим підвищенням температури від $T_{\max} = 770$ К до 1670 К коефіцієнт теплопровідності зменшується від $\lambda = 126,8$ до $\lambda = 11$ Вт/м·К.

10. На рис. 18 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) платини від температури (T). Як видно з рис. 18, зі зростанням температури від $T = 100$ до $T = 1800$ К коефіцієнт теплопровідності незначно зменшується від $\lambda = 74$ до $\lambda = 64,5$ Вт/м·К.

2.3. Залежність коефіцієнта теплопровідності сплавів від температури.

За даними [1] побудовано температурні залежності сплавів відносно коефіцієнта теплопровідності.

1. На рис. 19 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) сплаву міді $\text{Cu} + 1,5\% \text{Be}$ від температури (T). Як видно з рис. 19, зі зростанням температури від $T = 20$ до $T = 375$ К коефіцієнт теплопровідності зростає від $\lambda = 17,7$ до $\lambda = 180$ Вт/м·К, а залежність $\lambda \sim f(T)$ носить нелінійний характер.

2. На рис. 20 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) сплавів міді (мосяжів): латуні Л68 ($\text{Cu} + 30\% \text{Zn}$), латуні ЛАН 59-3-2 ($\text{Cu} + 3\% \text{Al} + 2,5\% \text{Ni}$) та латуні Л62 ($\text{Cu} + 40\% \text{Zn}$) від температури (T). Зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідності збільшується. Найвищі його значення спостерігаються у латуні Л62 ($\text{Cu} + 40\% \text{Zn}$).

3. На рис. 21 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) промислових сплавів (бронз) від температури (T). Як і в попередніх випадках коефіцієнт теплопровідності зростає з підвищенням температури. Максимальні значення належать сплаву марки Бр А-5, а мінімальні — сплаву марки Бр 0Ф 10-1. Залежності описуються лінійними рівняннями. Як видно з рис. 21, чим більший вміст цинку у сплавах бронзи (криві 2, 4, 5) і менший вміст стануму (криві 1, 5, 6) та алюмінію (криві 7, 8), тим вищі значення коефіцієнта теплопровідності.

4. На рис. 22 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) сплавів титану: ОТ4-0 ($\text{Ti} + 0,8\% \text{Al} + 0,8\% \text{Mn}$), ОТ4-1 ($\text{Ti} + 1,5\% \text{Al} + 1,0\% \text{Mn}$), ОТ4-2 ($\text{Ti} + 6\% \text{Al} + 1,5\% \text{Mn}$) від температури (T). Як видно з рис. 22, коефіцієнт теплопровідності збільшується зі зростанням температури. За температури 673 К коефіцієнт теплопровідності для сплавів ОТ4-1, ОТ4-2 однаковий. Залежність описується лінійними рівняннями.

5. На рис. 23 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) сплавів титану ВТ 23 ($\text{Ti} + 4,5\% \text{Al} + 2\% \text{Mo} + 4,5\% \text{V} + 0,6\% \text{Fe} + 1\% \text{Cr}$), ВТ 20 ($\text{Ti} + 6\% \text{Al} + 2\% \text{Zr} + 1\% \text{Mo} + 1\% \text{V}$) від температури (T). Зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідності збільшується. Для сплаву ВТ 23 значення λ дещо вищі.

6. На рис. 24 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) сплавів титану ВТ 16 ($\text{Ti} + 2,5\% \text{Al} + 5\% \text{Mo} + 5\% \text{V}$), ВТ 14 ($\text{Ti} + 4,5\% \text{Al} + 3\% \text{Mo} + 1\% \text{V}$) від температури (T). З рис. 24 видно, що зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідності збільшується. Дещо більші значення λ спостерігаються для сплаву ВТ 16.

7. На рис. 25 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) нелегованих, низько- та середньолегованих кристалічних сталей перлітного класу марки: сталь Ст 20, сталь У 8, сталь 45 від температури (T). На відміну від попередніх

випадків, коефіцієнт теплопровідності сталей з підвищенням температури зменшується.

8. На рис. 26 приведено залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) нержавіючих, термостійких і термоміцних сталей австенітного класу марки: X18H9T (1X18H9T, ЭЯ1Т), X17H13M2T

(OX18H12M2T, ЭИ448) від температури (Т). З рис. 26 видно, що зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідності цих сталей збільшується. Для стопу марки X17H13M2T (OX18H12M2T, ЭИ448) спостерігається незначне збільшення коефіцієнта теплопровідності.

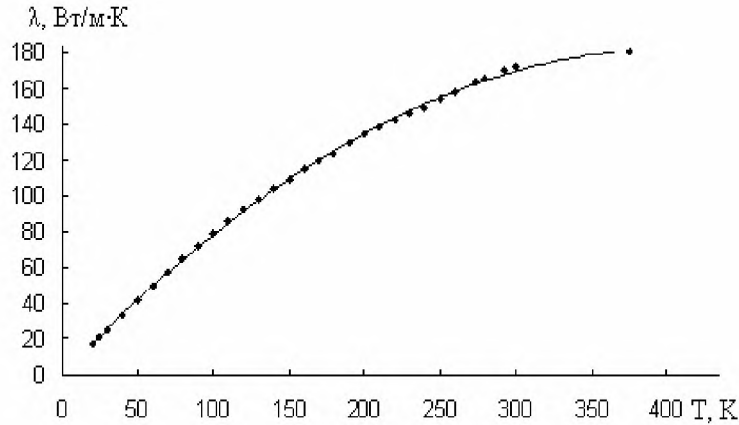


Рис. 19. Залежність коефіцієнта теплопровідності мідного стопу Cu + 1,5% Ве від температури.

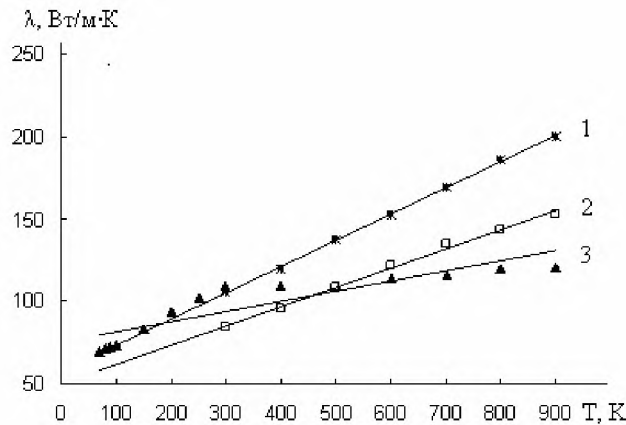


Рис. 20. Залежність коефіцієнта теплопровідності мідних стопів м'ясяжів від температури: 1 – латуні Л62 (Cu + 40%Zn), 2 – латуні Л68 (Cu + 30%Zn) 3 – латуні ЛАН 59-3-2 (Cu + 3%Al+2,5%Ni).

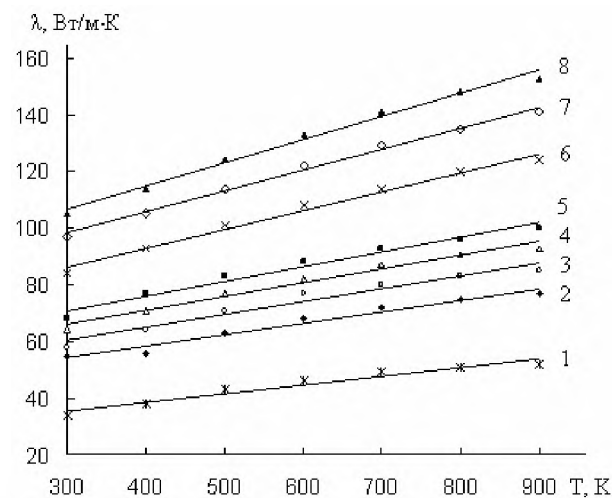


Рис. 21. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури промислових мідних стопів – спижів (брондз, бронз) марки: 1 – Бр 0Ф 10-1 (Cu + 10%Sn + 1%P); 2 – Бр 0Ц 10-2 (Cu + 10%Sn + 2%Zn); 3 – Бр 0С 5-25 (Cu + 5%Sn + 25%Pb); 4 – Бр 0Ц 6-3 (Cu + 6%Sn + 3%Zn); 5 – Бр 0Ц 8-4 (Cu + 8%Sn + 4%Zn); 6 – Бр 0Ц 4-3 (Cu + 4%Sn + 3%Zn); 7 – Бр А-7 (Cu + 7%Al); 8 – Бр А-5 (Cu + 5%Al).

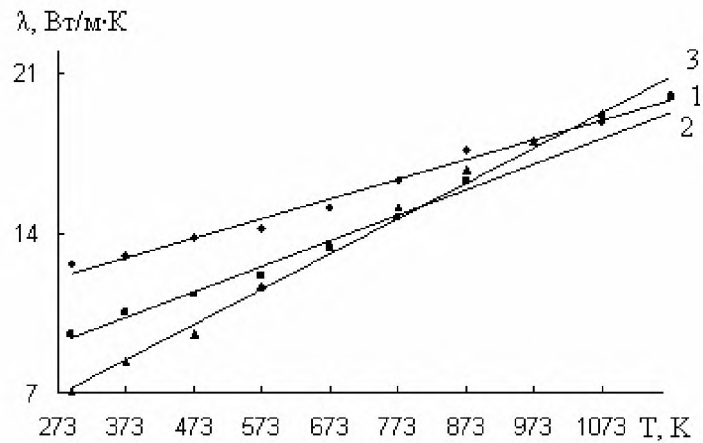


Рис. 22. Залежність коефіцієнта теплопровідності титанових сплавів від температури: 1 – сполу титану OT4-0 (Ti + 0,8%Al + 0,8%Mn); 2 – OT4-1 (Ti + 1,5%Al + 1,0%Mn); 3 – OT4-2 (Ti + 6%Al + 1,5%Mn).

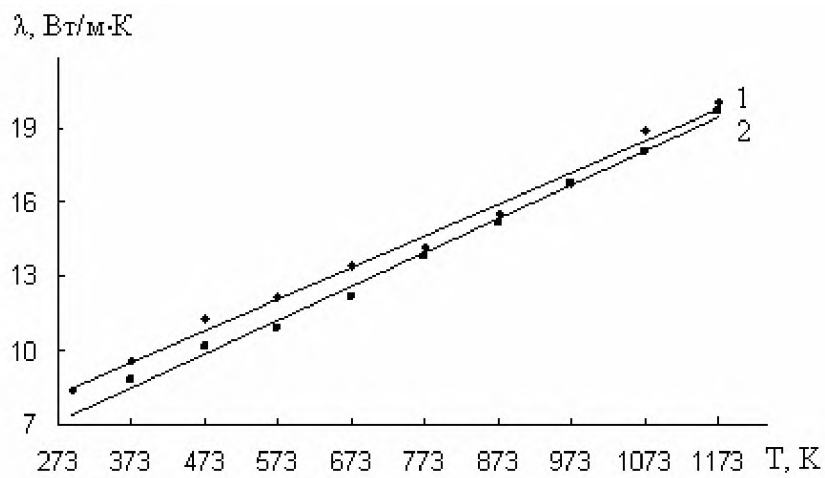


Рис. 23. Залежність коефіцієнта теплопровідності титанових сплавів від температури: 1 – сполу титану VT 23 (Ti + 4,5%Al + 2%Mo + 4,5%V + 0,6%Fe + 1%Cr); 2 – сполу VT 20 (Ti + 6%Al + 2%Zr + 1%Mo + 1%V).

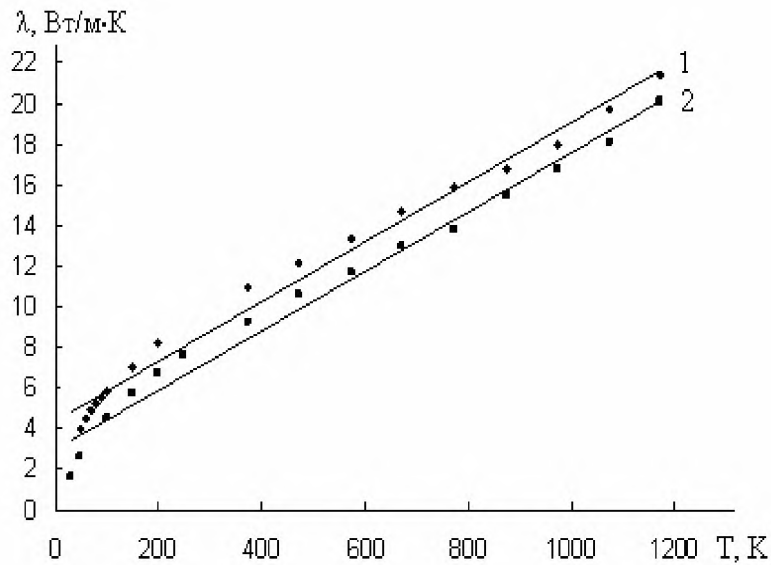


Рис. 24. Залежність коефіцієнта теплопровідності титанових сплавів від температури: 1 – сполу титану VT 16 (2,5%Al + 5%Mo + 5%V); 2 – сполу VT14 (4,5%Al + 3%Mo + 1%V).

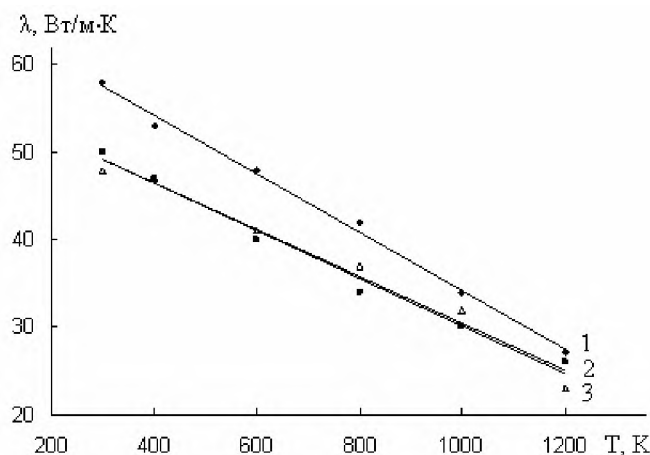


Рис. 25. Залежність коефіцієнта теплопровідності нелегованих, низко- та середньолегованих сталей перлітного класу від температури марки: 1 – сталь Ст 20, 2 – сталь У 8, 3 – сталь 45.

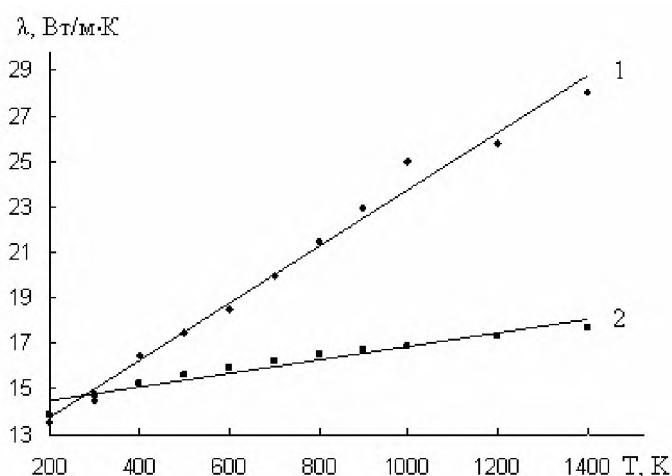


Рис. 26. Залежність коефіцієнта теплопровідності нержавіючих, термостійких і термоміцних сталей аустенітного класу від температури марки: 1 – X18H9T (1X18H9T, ЭЯ1Т), 2 – X17H13M2T (OX18H12M2T, ЭИ448).

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

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

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

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

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

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

Результати регресійної аналізи зведено у табл. 1 для металів та у табл. 2 для сплавів. Як видно з табл. 1, у більшості металів для залежностей $\lambda \sim f(T)$ 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 $\lambda \sim f(T)$ апроксимується поліномом першого порядку.

Як видно з табл. 2, у більшості сплавів для залежностей $\lambda \sim f(T)$ існує надійний зв'язок при апроксимації поліномом першого порядку (окрім сплаву Cu+1,5%Be, залежність $\lambda \sim f(T)$ якого апроксимується поліномом другого порядку).

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

У табл. 3 зведено значення коефіцієнта теплопровідності 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. 27–31 приведено залежності коефіцієнта теплопровідності 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 рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції залежностей $\lambda = f(Z)$ та $\lambda = f(r_A)$. Як видно з табл. 4, ступінь лінійності для

кореляційного зв'язку «коефіцієнт теплопровідності λ від порядкового номера первня Z у Періодичній системі первнів» складає:

- для $\alpha = 0,05$ $\xi_2(r) = 0,04 - 0,72$; $\xi_2(t) = 0,03 - 0,65$; $\xi_2(Z) = 0,04 - 0,68$ (для всіх температур);

- для $\alpha = 0,01$ $\xi_2(r) = 0,03 - 0,58$; $\xi_2(t) = 0,02 - 0,46$; $\xi_2(Z) = 0,03 - 0,52$ (для всіх температур),

а ступінь нелінійності у цьому зв'язку складає:

- для $\alpha = 0,05$ $\xi_1(r) = 1,39 - 28,4$; $\xi_1(t) = 1,53 - 30,52$; $\xi_1(Z) = 1,47 - 28,49$ (для всіх температур);

- для $\alpha = 0,01$ $\xi_1(r) = 1,72 - 36,45$; $\xi_1(t) = 2,16 - 41,13$; $\xi_1(Z) = 1,94 - 37,51$ (для всіх температур).

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

- для $\alpha = 0,05$ $\xi_2(r) = 0,14 - 0,65$; $\xi_2(t) = 0,12 - 0,62$; $\xi_2(Z) = 0,13 - 0,63$ (для всіх температур);

- для $\alpha = 0,01$ $\xi_2(r) = 0,12 - 0,50$; $\xi_2(t) = 0,09 - 0,46$; $\xi_2(Z) = 0,10 - 0,48$ (для всіх температур),

а ступінь нелінійності у цьому зв'язку складає: $\xi_1(r) = 1,55 - 6,97$; $\xi_1(t) = 1,61 - 8,34$; $\xi_1(Z) = 1,58 -$

$- 7,83$ (для $\alpha = 0,05$) та $\xi_1(r) = 1,98 - 8,62$; $\xi_1(t) = 2,17 - 11,77$; $\xi_1(Z) = 2,08 - 10,30$ (для $\alpha = 0,01$), що дозволяє зробити висновок: узагальнена залежність $\lambda = f(Z)$ та $\lambda = f(r_A)$ для 35 металів та інтервалу температур 100–900 К є нелінійною з високим ступенем нелінійності.

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

Таблиця 1

Лінійна та поліноміальна моделі залежності коефіцієнта теплопровідності 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	$y = 3 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0224x + 62,184$	0,9915
0,272	Cu	$y = -0,1034x + 447,68$	0,8573	$y = 4 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,1503x + 457,24$	0,8667
0,128	Ag	$y = -0,0602x + 441,61$	0,9279		
0,144	Au	$y = -0,1165x + 351,83$	0,9465		
0,146	Mg	$y = -0,0833x + 182,51$	0,9446		
0,112	Zn	$y = -0,0906x + 155,14$	0,9870		
0,16	Al	$y = -0,2518x + 295,12$	0,7412	$y = 0,0023x^2 - 1,1749x + 381,27$	0,9198
0,197	In	$y = -0,4584x + 166,24$	0,9535	$y = -0,0018x^2 + 0,2954x + 97,449$	0,9996
0,215	Tl	$y = -0,08x + 71,161$	0,9986	$y = -2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0717x + 70,407$	0,9988
0,155	Ti	$y = 0,0092x + 17,521$	0,7924	$y = -9 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,044x + 14,43$	0,9826
0,147	V	$y = 0,0078x + 30,836$	0,9913		
0,16	Nb	$y = 0,0207x + 46,506$	0,9975		
0,167	Ta	$y = 0,0153x + 58,155$	0,9774		
0,162	Cr	$y = -0,0526x + 114,82$	0,8402	$y = 5 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,1225x + 130,1$	0,9320
0,175	Mo	$y = -0,0389x + 186,64$	0,9052	$y = -2 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0327x + 184,05$	0,9066
0,134	W	$y = -0,0157x + 134,24$	0,9985	$y = 2 \cdot 10^{-7}x^2 - 0,0161x + 134,41$	0,9985
0,149	Fe	$y = -0,0444x + 88,503$	0,8597	$y = 767,88x^{-0,4159}$	0,9611
0,1545	Co			$y = -0,0002x^2 + 0,2649x + 15,112$	0,9781
0,13	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		

Математичні моделі залежностей теплопровідності 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
X18Н9Т (1X18Н9Т, ЭЯ1Т)	$y = 0,0125x + 11,242$	0,9864
X17Н13М2Т (ОХ18Н12М2Т, ЭИ448)	$y = 0,003x + 13,879$	0,9359

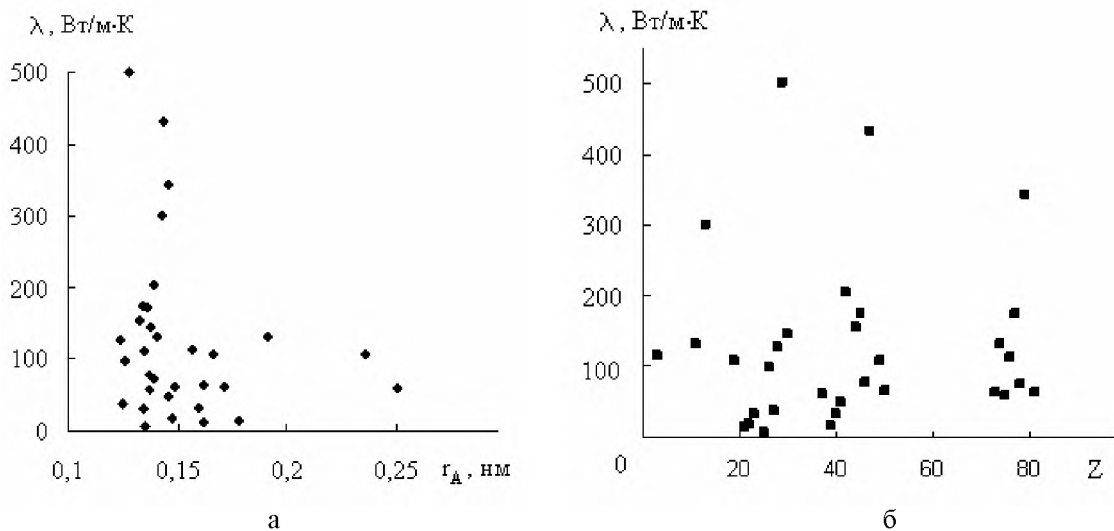


Рис. 27. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 100 К.

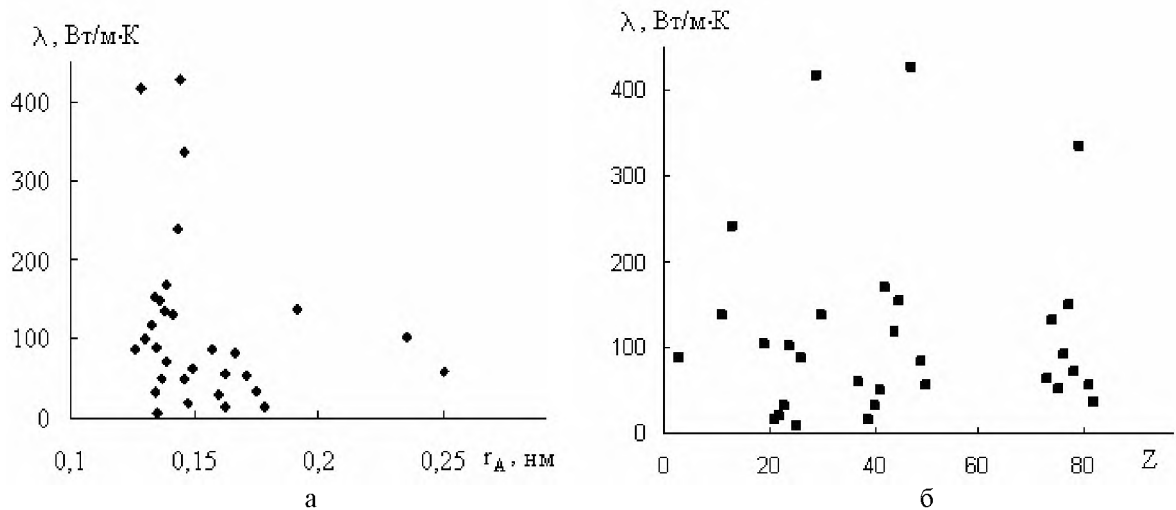


Рис. 28. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 200 К.

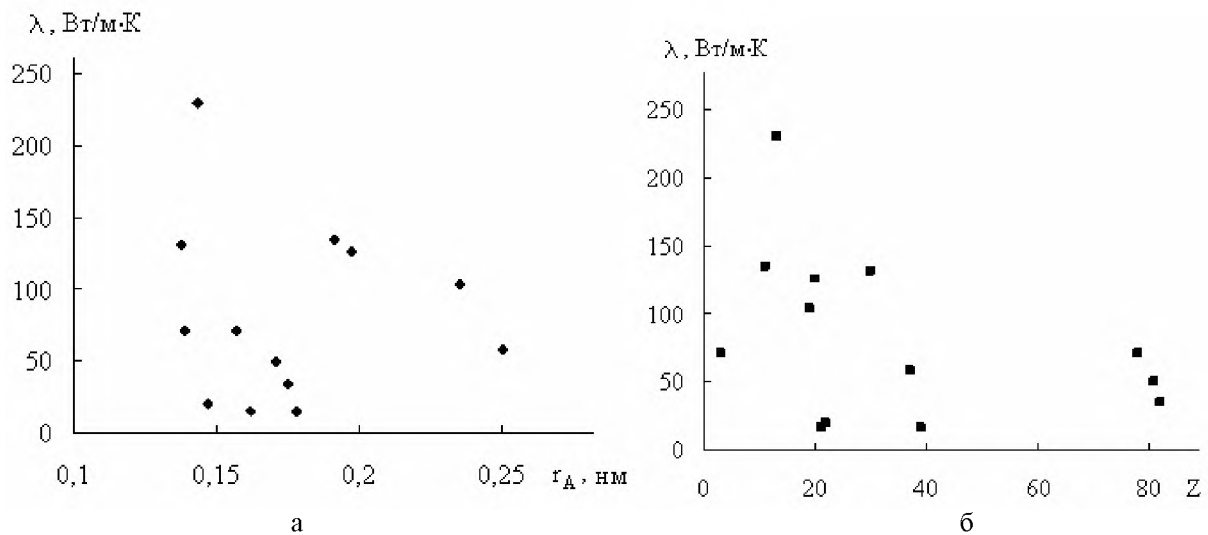


Рис. 29. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 273 К.

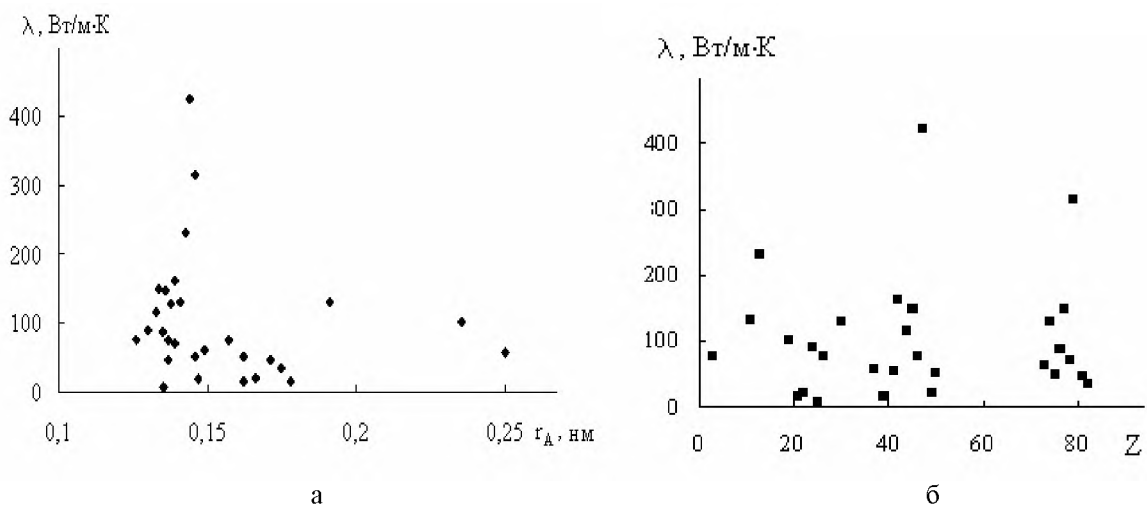


Рис. 30. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 300 К.

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта теплопровідності металів та сплавів від температури, радіусу атомів та порядкового номера в Періодичній системі першнів

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	0,135	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 рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції зв'язків $\lambda \sim Z$, $\lambda \sim r_A$ за його критичним значенням ($r_{кр.}$), критерієм Стюдента (t_T) та перетворенням Фішера (z_T)

Зв'язки між величинами		Рівні значущості	ΔH_T , кДж/кг				
			100 К	200 К	273 К	300 К	900 К
Кореляційний зв'язок:			Розрахунковий коефіцієнт кореляції (r_p)				
$\lambda \sim Z$			0,0413	0,0125	-0,3978	0,0621	-0,2095
$\lambda \sim r_A$			-0,2077	-0,2298	-0,0793	-0,1833	-0,4186
N			32	31	13	29	7
f = N-2			30	29	11	27	5
			Критичний коефіцієнт кореляції				
$r_{кр.} \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}; f = N-2\}$		$\alpha = 0,05$	0,3494	0,3550	0,5529	0,3673	0,7545
		$\alpha = 0,01$	0,4488	0,4556	0,6835	0,4705	0,8745
$\lambda \sim Z$	$\xi_1(r)$ $\xi_2(r)$	$\alpha = 0,05$	8,460	28,400	1,390	5,915	3,601
			0,118	0,035	0,719	0,169	0,278
	$\xi_1(r)$ $\xi_2(r)$	$\alpha = 0,01$	10,867	36,448	1,718	7,576	4,174
			0,092	0,027	0,582	0,132	0,240
$\lambda \sim r_A$	$\xi_1(r)$ $\xi_2(r)$	$\alpha = 0,05$	1,682	1,545	6,972	2,004	1,802
			0,594	0,647	0,143	0,499	0,555
	$\xi_1(r)$ $\xi_2(r)$	$\alpha = 0,01$	2,161	1,983	8,619	2,567	2,089
			0,463	0,504	0,116	0,390	0,479
Кореляційний зв'язок:			Статистика Стюдента (t_p)				
$\Delta H_T \sim Z$			0,226	0,067	-1,438	0,323	-0,479
$\Delta H_T \sim r_A$			-1,163	-1,272	-0,264	-0,969	-1,031
$t_T \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}; f = N-2\}$		$\alpha = 0,05$	2,042	2,045	2,201	2,052	2,571
		$\alpha = 0,01$	2,750	2,756	3,106	2,771	4,032
$\lambda \sim Z$	$\xi_1(t)$ $\xi_2(t)$	$\alpha = 0,05$	9,035	30,522	1,531	6,353	5,367
			0,111	0,033	0,653	0,157	0,186
	$\xi_1(t)$ $\xi_2(t)$	$\alpha = 0,01$	12,168	41,134	2,160	8,579	8,418
			0,082	0,024	0,463	0,117	0,119
$\lambda \sim r_A$	$\xi_1(t)$ $\xi_2(t)$	$\alpha = 0,05$	1,756	1,608	8,337	2,118	2,494
			0,570	0,622	0,120	0,472	0,401
	$\xi_1(t)$ $\xi_2(t)$	$\alpha = 0,01$	2,365	2,167	11,765	2,860	3,911
			0,423	0,462	0,085	0,350	0,256
Кореляційний зв'язок:			Статистика перетворення Фішера (z_p)				
$\Delta H_T \sim Z$			0,0410	0,0130	-0,4213	0,0621	-0,2132
$\Delta H_T \sim r_A$			-0,2111	-0,2342	-0,0792	-0,1851	-0,4465
$z_T \{q = 1 - \frac{\alpha}{2}\}$		$\alpha = 0,05$	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
		$\alpha = 0,01$	2,58	2,58	2,58	2,58	2,58
σ_Z			0,1857	0,1890	0,3162	0,1961	0,5000
$(z_T \cdot \sigma_Z)$		$\alpha = 0,05$	0,3640	0,3704	0,6198	0,3844	0,9800
		$\alpha = 0,01$	0,4791	0,4876	0,8158	0,5059	1,2900
$\lambda \sim Z$	$\xi_1(Z)$ $\xi_2(Z)$	$\alpha = 0,05$	8,878	28,492	1,471	6,190	4,597
			0,113	0,035	0,680	0,162	0,218
	$\xi_1(Z)$ $\xi_2(Z)$	$\alpha = 0,01$	11,685	37,508	1,936	8,147	6,051
			0,086	0,027	0,516	0,123	0,165
$\lambda \sim r_A$	$\xi_1(Z)$ $\xi_2(Z)$	$\alpha = 0,05$	1,724	1,582	7,826	2,077	2,195
			0,580	0,632	0,128	0,482	0,456
	$\xi_1(Z)$ $\xi_2(Z)$	$\alpha = 0,01$	2,270	2,082	10,301	2,733	2,889
			0,441	0,480	0,097	0,366	0,346

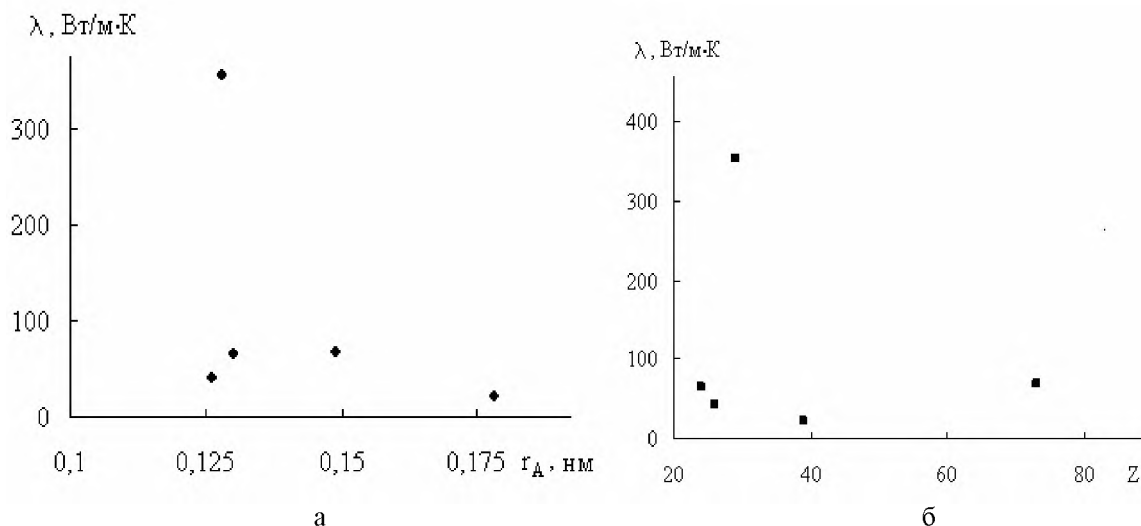


Рис. 31. Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності від радіусу атома (а) та порядкового номера металу у Періодичній системі первнів (б) за температури 900 К.

Висновки

1. Досліджено температурну залежність коефіцієнта теплопровідності металів та сплавів.

2. Встановлено, що за низьких температур ($T \leq 100$ К) коефіцієнт теплопровідності більшості металів інтенсивно зростає до температури піка максимального його значення. З подальшим зростанням температури коефіцієнт теплопровідності металів різко зменшується.

3. Встановлено, що за високих температур у межах від 50–100 до 300–2500 К коефіцієнт теплопровідності більшості металів із зростанням температури зменшується (окрім титану та металів VB групи Періодичної системи первнів, коефіцієнт теплопровідності яких із зростанням температури незначно збільшується).

4. Встановлено, що коефіцієнт теплопровідності більшості досліджених сплавів із зростанням температури зростає (окрім сталей перлітного

класу, коефіцієнт теплопровідності яких із зростанням температури лінійно зменшується).

5. Отримано апроксимаційні залежності λ від температури для 35 металів та сплавів. Встановлено, що для залежностей $\lambda \sim f(T)$ існує надійний зв'язок при апроксимації як поліномом першого порядку, так і поліномом другого порядку. Для більшості сплавів залежність $\lambda \sim f(T)$ апроксимується поліномом першого порядку (окрім, сплаву Cu+1,5%Be, залежність $\lambda \sim f(T)$ якого апроксимується поліномом другого порядку).

6. Встановлено за результатами кореляційної аналізи, що між коефіцієнтом теплопровідності і радіусом атомів та порядковим номером металів за температур 100, 200, 273, 300 і 900 К немає лінійного зв'язку. Подано оцінку лінійності та нелінійності; узагальнено залежність $\lambda = f(Z)$ та $\lambda = f(r_A)$ для 35 металів та інтервалу температур 100–900 К.

Література

1. Лариков Л.Н. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник: Тепловые свойства металлов и сплавов / Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. – Киев: Наукова думка, 1985. – 438с.
2. Гомонай В.І. Фізична та колоїдна хімія. Підручник. – Вінниця: Нова книга, 2007. – 496с.
3. Горшков В.И. Основы физической химии / Горшков В.И., Кузнецов И.А. – Москва: Изд-во МГУ, 1993. – 335 с.
4. Даниэльс Ф. Физическая химия / Даниэльс Ф., Олберти Р. – Москва: Мир, 1978. – 647с.
5. Жуховицкий А.А. Краткий курс физической химии / Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. – Москва: Металлургия, 1979. – 368с.
6. Зимон А.Д. Физическая химия: Учебник / Зимон А.Д., Лещенко Н.Ф. – Москва: Химия, 2000. – 320с.
7. Каданер Л.І. Фізична і колоїдна хемія. – Київ: Вища шк., 1983. – 288 с.
8. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. – Москва: Химия, 1975. – 584с.
9. Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – Москва: Химия, 1978. – 624с.
10. Физическая химия / Кнорре Д.Г., Крылова Л.Ф., Музыкантов В.С. – Москва: Высш. шк., 1981. – 328с.
11. Кононський О.І. Фізична і колоїдна хімія: Підручник. – Київ: Центр учбової л-ри, 2009. – 312 с.
12. Краснов К.С. Физическая химия. – Москва: Высш. шк., 1995. – 512 с. (Ч 1); – 332 с. (Ч 2).

13. **Физическая и коллоидная химия** / Красовский И.В., Вайль Е.И., Безуглый В.Д. – Киев: Вища шк., 1983. – 296с.
14. **Лебідь В.І.** Фізична хімія: Підручник. – Харків: Фоліо, 2005. – 480с.
15. **Ліпатніков В.С.** Фізична і колоїдна хімія / Ліпатніков В.С., Козаков К.М. – Київ: Вища шк., 1983. – 198с.
16. **Лукьянов А.Б.** Физическая и коллоидная химия. – Москва: Химия, 1988. – 288с.
17. **Люпис К.** Химическая термодинамика материалов. – Москва: Металлургия, 1989. – 503 с.
18. **Мороз А.С.** Фізична та колоїдна хімія / Мороз А.С., Ковальова А.Г. – Львів: Світ, 1994. – 278с.
19. **Полторац О.М.** Термодинамика в физической химии. – Москва: Высш. шк., 1991. – 320с.
20. **Свідзинський А.В.** Лекції з термодинаміки: Навч. посібник. – Луцьк: Вежа, 1999. – 83с.
21. **Семнохин И.А.** Физическая химия. – Москва: Изд-во МГУ, 2001. – 272 с.
22. **Стромберг А.Г.** Физическая химия: Учебник / Стромберг А.Г., Семченко Д.П. – Москва: Высш. шк., 1999. – 528 с.
23. **Стромберг А.Г.** Физическая химия / Стромберг А.Г., Семченко Д.П. – Москва: Высш. шк., 1988. – 496с.
24. **Физическая химия.** В 2-х кн. / Краснов К.С., Воробьев Н.К., Годнев И.Н. и др. – Москва: Высш. шк., 2001. – 319с.
25. **Кабачний В.І.** Фізична і колоїдна хімія / Кабачний В.І., Осіпенко Л.К., Грицан Л.Д. та ін. – Харків: Прапор, вид-во Укр.ФА, 1999. – 368с.
26. **Фролов Ю.Г.** Физическая химия / Фролов Ю.Г., Белик В.В. – Москва: Химия, 1993. – 464 с.
27. **Цветкова Л.Б.** Фізична хімія: Теорія і задачі: Навч. посіб. – Львів: Магнолія-2006, 2008. – 415с.
28. **Эткинс П.** Физическая химия. В 2-х томах. – Москва: Мир, 1980. – 582с. – Т. 1. – 584с. –Т. 2.
29. **Адлер Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – Москва: Наука, 1976. – 280с.
30. **Степнов М.Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний. – Москва: Машиностроение, 1972. – 232с.
31. **Мюллер П.** Таблицы по математической статистике / Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. – Москва: Финансы и статистика, 1982. – 272с.
32. **Краткий справочник физико-химических величин** / Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. – Ленинград: Химия, 1983. – 232с.

Базюк Л.В. – викладач кафедри неорганічної та фізичної хемії.

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хемії.

Бертолон Н.І. – студентка III курсу кафедри неорганічної та фізичної хемії, спеціалізація неорганічна хемія.

Рецензент

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