

Геннадій Сіренко  
Владислав Свідерський  
Марія Складанюк



**Фізичні методи дослідження речовин:  
Ч.І. Теплофізичні методи та  
властивості металів та сплавів**



Івано-Франківськ

2020

**Геннадій Сіренко  
Владислав Свідерський  
Марія Складанюк**

**Фізичні методи дослідження речовин:  
Ч.І. Теплофізичні методи та  
властивості металів та сплавів**

**Івано-Франківськ**

**2020**

УДК 536.2; 536.63; 544.333; 544.022.5; 539.2164 544.77

ББК 22.37

С 40

*Рекомендовано до друку Вченою Радою Факультету природничих наук ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» протокол №3 від 19.11. 2020р.*

**А в т о р и:**

**Сіренко Геннадій Олександрович**, заслужений діяч науки і техніки України, академік Академії технологічних наук України, доктор технічних наук, професор (м. Івано-Франківськ).

**Свідерський Владислав Петрович**, кандидат технічних наук, доцент (м. Хмельницький).

**Складанюк Марія Богданівна**, кандидат фізико-математичних наук, доцент (м. Івано-Франківськ).

**Р е ц е н з е н т и:**

**Миронюк І.Ф.**, доктор хімічних наук, професор, (м. Івано-Франківськ);

**Засна Ю.П.**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, (м. Хмельницький).

С 40 Сіренко Г.О., Свідерський В.П., Складанюк М.Б. Фізичні методи дослідження речовин: Ч.І. Теплофізичні методи та властивості металів та стопів: монографічний підручник (спеціальний курс лекцій. – 2-ге вид. випр., доп.) / за ред. Г.О. Сіренка – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2020, 230 с. – Літ. 467. – Форм. 479. – Рис. 120. – Табл. 24 – 100 прим.

**ISBN 978-966-8969-71-3**

У монографічному підручнику приведений спеціальний курс лекцій. За літературними джерелами інформації та результатами власних (авторів) теоретичних та експериментальних досліджень подано: теоретичні основи і результати дослідження теплофізичних властивостей металів та стопів, проаналізовано методами кореляційного і регресійного аналізу та обгрунтовані залежності коефіцієнтів теплоємності та теплопровідності, зміни ентальпії, коефіцієнта лінійного теплового розширення від температури, порядкового номера первня Періодичної системи та радіуса атома металів.

Монографічний підручник (як спеціальний курс лекцій) адресується студентам, аспірантам та викладачам вищої школи за спеціальностями: хімія, хімічна технологія, фізика, матеріалознавство, тощо.

УДК 536.2; 536.63; 544.333; 544.022.5; 539.2164 544.77  
ББК 22.37

**Всі права застережені**  
**All rights reserved**

**ISBN 978-966-8969-71-3**

© Сіренко Г.О.  
© Свідерський В.П.  
© Складанюк М.Б., 2020

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ.....</b>	<b>8</b>
1.1. Теплоємність. Означення.....	8
1.1.1. Методи обчислення кількості енергії у формі тепла.. .....	8
1.1.2. Загальне означення теплоємності. Істинна і питома теплоємності.....	8
1.1.3. Обчислення кількості енергії у формі тепла за істинною і середньою теплоємностями.....	12
1.1.4. Геометричні образи істинної і середньої теплоємностей.....	16
1.2. Ізобарна та ізохорна теплоємності. Рівняння Майєра.....	18
1.2.1. Геометричні образи ізохорної та ізобарної теплоємностей.....	18
1.2.2. Зв'язок ізобарної та ізохорної теплоємностей.....	19
1.2.2.1. Рівняння Майєра для ідеального газу.....	19
1.2.2.2. Рівняння Майєра для неідеального газу.....	27
1.3. Зв'язок теплоємності з коефіцієнтом стискуваності газу.....	29
1.4. Теплоємність під час оборотного політропного процесу ідеального газу.....	31
1.5. Диференціальні рівняння теплоємності.....	35
1.6. Залежність ізобарної та ізохорної теплоємностей від тиску та об'єму.....	40
1.7. Зв'язок теплоємності з ентропією. Диференціальні рівняння ентропії.....	43
1.8. Залежність теплоємності газів від температури.....	46
1.8.1. Залежність ізобарної та ізохорної теплоємностей газів від температури.....	46
1.8.2. Залежність теплоємності від атомності газів і температури.....	46
1.9. Теплоємність рідин.....	57
1.10. Теплоємність твердих тіл.....	61
1.10.1. Молекулярно-кінетична теорія. Закон Дюлонга і Пті.....	62
1.10.2. Квантова теорія Дебая.....	64
1.10.3. Теплоємність шарових структур.....	68
1.10.3.1. Структура невзаємодіючих шарів.....	68
1.10.3.2. Структура із взаємодіючими шарами.....	69
1.11. Залежність коефіцієнта теплоємності металів та сплавів від	

температури.....	72
1.11.1. Залежність коефіцієнта теплоємності металів від температури за низьких температур ( $T \leq 200\text{K}$ ).....	76
1.11.2. Залежність коефіцієнта теплоємності металів від температури за високих температур у межах від 200 до 2860K.....	83
1.11.3. Залежність коефіцієнта теплоємності стопів від температури.....	89
1.11.4. Залежність коефіцієнта теплоємності від температури (регресійна аналіза).....	90
1.11.5. Залежність коефіцієнта теплоємності від радіусу атома первня та його порядкового номера в Періодичній системі первнів (кореляційна аналіза).....	103
<b>Висновки до розділу 1.....</b>	<b>104</b>
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ.....</b>	<b>106</b>
2.1. Температурне поле.....	106
2.2. Тепловий потік. Гіпотеза Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності.....	110
2.3. Особливості передачі енергії у формі тепла теплопровідністю в діелектриках.....	114
2.4. Залежність коефіцієнта теплопровідності металів та стопів від температури.....	116
2.4.1. Залежність коефіцієнта теплопровідності металів від температури за низьких температур ( $T \leq 100\text{ K}$ ).....	116
2.4.2. Залежність коефіцієнта теплопровідності металів від температури за високих температур у межах від 50-100 до 300-2500 K.....	123
2.4.3. Залежність коефіцієнта теплопровідності стопів від температури.....	125
2.4.4. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури (регресійна аналіза).....	129
2.4.5. Залежність коефіцієнта теплопровідності від радіусу атома металу та його порядкового номера в Періодичній системі первнів (кореляційна аналіза).....	130
<b>Висновки до розділу 2.....</b>	<b>138</b>
<b>РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНТАЛЬПІ.....</b>	<b>140</b>
3.1. Основні означення.....	140

3.2. Загальні зауваги.....	144
3.3. Залежність зміни ентальпії металів та стопів від температури.....	145
3.3.1. Залежність зміни ентальпії металів від температури.....	145
3.3.2. Залежність ентальпії від температури (регресійна аналіза).....	149
3.3.3. Залежність ентальпії від радіусу атома первня та його порядкового номера в Періодичній системі первнів (кореляційна аналіза).....	149
<b>Висновки до розділу 3.....</b>	<b>156</b>
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛООВОГО РОЗШИРЕННЯ.....</b>	<b>157</b>
4.1. Основні означення. Теорії теплового розширення твердих тіл.....	
4.1.1. Теорія двоатомної моделі.....	157
4.1.2. Феноменологічна теорія.....	159
4.2. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення металів та стопів від температури.....	162
4.2.1. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення металів від температури.....	162
4.2.2. Температурна залежність коефіцієнтів теплового розширення металів, вимірних паралельно та перпендикулярно до головної вісі кристалу.....	173
4.2.3. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення стопів від температури.....	176
4.2.4. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури (регресійна аналіза).....	184
4.2.5. Залежність лінійного коефіцієнта теплового розширення від радіусу атома первня та його порядкового номера в Періодичній системі первнів (кореляційна аналіза).....	184
4.2.6. Теплофізичні властивості вакуумних матеріалів.....	192
<b>Висновки до розділу 4.....</b>	<b>195</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....</b>	<b>196</b>

## ВСТУП

Для виготовлення машин, апаратів та приладів тощо застосовують переважно металеві матеріали, до яких належать метали та їх стопи (сплави), які контактують з металами чи неметалами.

Одним з найважливіших характеристик їх виготовлення, зберігання, застосування та експлуатації у різних галузях промисловости є теплофізичні властивості. Знання про ці характеристики дозволяють обґрунтовано вибрати межі застосування та оптимальні температурні інтервали експлуатації виробів із таких матеріалів.

У теплофізиці маємо значну кількість коефіцієнтів, які часто є носіями власних імен. Коефіцієнт [лат. со (com, cum) – сумісно, разом + efficiens (efficietus) – виконуючий, виробляючий] – числовий множник при буквенному вираженні величини, відомий множник за певного ступеня невідомого або сталий множник при змінній величині у рівняннях. Коефіцієнти часто є величинами безрозмірними. У певних випадках коефіцієнтами називають характеристики явищ та процесів, властивостей або комплексу властивостей, або комплексу властивостей матеріалів, при цьому коефіцієнти можуть мати самостійне значення і не входить у рівняння, що описують ці явища та процеси.

Відомо [24, 50, 51, 55, 67, 74, 83, 91, 94-96, 103, 111, 112, 125, 126, 128, 131, 158, 163, 165, 206, 232], що ентальпія ( $H$ ), питома теплоємність ( $C_p$ ), коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda$ ) та лінійний та об'ємний коефіцієнти теплового розширення ( $\alpha$ ) залежать від температури ( $T$ ), тиску ( $p$ ) тощо. Але на сьогодні відсутні: ретельний аналіз цих залежностей для металів та стопів, не приведені у доступних літературних джерелах інформації апроксимаційні функції та не виявлений кореляційний зв'язок між ентальпією, теплоємністю, коефіцієнтом теплопровідності, лінійним коефіцієнтом теплового розширення та температурою, порядковим номером і радіусом атома первня Періодичної таблиці первнів, що утруднює обґрунтований вибір спряженої металевої поверхні для зразків твердої колоїдної системи на основі полімерів, наприклад, для контактної динамічної пари тертя та зношуванням «полімерний композит-метал».

Мета цієї частини роботи є дослідження залежності зміни ентальпії, питомої теплоємності, коефіцієнта теплопровідності та лінійного коефіцієнта теплового розширення від температури для металів і стопів та пошуку кореляційних зв'язків і апроксимаційних математичних моделей між цими величинами та температурою, радіусом і порядковим номером атомів металів Періодичної системи первнів.

Теоретична частина монографії виконана і написана Г.О. Сіренком та В.П. Свідерським у 1972-2000 роках у Хмельницькому технологічному

інституті (тепер Хмельницький національний університет), а розрахункова частина роботи виконана Г.О. Сіренком, М.Б. Складанюк та Л.В. Базюк у 2004-2014 роках у Прикарпатському національному університеті імені Василя Стефаника. Результати досліджень, що викладені у монографічному підручнику знайшли відбиток у докторській дисертації Г.О. Сіренко (1997) та кандидатських дисертаціях В.П. Свідерського (1981), М.Б. Складанюк (2015), Л.В. Базюк (2014) (науковий керівник обох кандидатських дисертацій професор Г.О. Сіренко).

Внесок авторів у створені монографічного підручника рівноцінний.

Наукове, навчально-методичне видання

*Сіренко Геннадій Олександрович*  
*Свідерський Владислав Петрович*  
*Складанюк Марія Богданівна*

**Фізичні методи дослідження речовин: Ч. I.**  
**Теплофізичні методи та властивості**  
**металів та сплавів**

Монографічний підручник  
(спеціальний курс лекцій)

Літературний редактор – Сіренко Г.О.  
Технічний редактор – Складанюк М.Б.  
Комп'ютерна верстка - Складанюк М.Б.  
Коректор – Голіней О.М.  
Макет обкладинки - Голіней О.М.

Підписано до друку 25.11.2020. Формат 60x84/8  
Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура «Times New Roman». Ум. друк. арк. 19.5/  
Наклад 100. Зам. №198 від 25.11.2020.

Друк: підприємець Голіней О.М.  
76008, м. Івано-Франківськ, вул. Галицька, 128  
тел.: (0342) 58-04-32, +38 050 540 30 64