

# Акустичні термометри з чутливими елементами із матеріалів нікелевої групи

Инж. Т. Крайник; проф., д.т.н. Я. Луцик; проф., д.т.н. С. Яцишин; м.н.с. А. Семенистий

Національний університет «Львівська політехніка»

**Abstract.** There are considered the acoustic thermometers with the sensitive elements made from Ni-based alloys. The last ones are characterized by the high reproducibility of propagation velocity of the acoustic pulses on temperature dependences and therefore may be recommended for high temperature applications in acoustic thermometers design. The attenuation of the measured signals has to be compensated by the corresponding raise of signal amplification coefficient in a controlled temperature range at 700 EC and higher for alumel and khromel.

**Вступ.** Вимірювання температур – це одна з найважливіших процедур під час виконання більшості технологічних процесів у виробництві та різноманітних фізичних досліджень у науці. На сьогоднішні існує чимало засобів для вимірювання температури, але не завжди вони задовольняють зростаючим сучасним вимогам. Тому дослідники спрямовують свої зусилля як на удосконалення існуючих засобів вимірювання температури, та і на створення принципово нових. Перспективними засобами для вимірювання середніх та високих температур є акустичні термометри, які мають низку переваг перед серійними приладами, зокрема, значно ширший вибір матеріалів для чутливих елементів. Це можуть бути гази, рідини, тверді матеріали. Тому вважаємо доцільним виконати дослідження низки властивостей матеріалів нікелевої групи (алюмелю, хромелю, копелю), які характеризуються високою стабільністю електрофізичних властивостей за підвищених температур і успішно використовуються, як матеріали для виготовлення чутливих елементів термоелектричних термометрів [1].

**Мета** праці - дослідження реологічних характеристик матеріалів на основі *Ni*, результати яких дають змогу дійти висновку щодо їх придатності для створення чутливих елементів акустичних термометрів.

**Основи вимірювання температури акустичними термометрами.**

Акустична термометрія – це термометрія, що базується на залежності швидкості поширення звуку (ультразвуку) у речовині від температури. Цією речовиною можуть бути гази, рідини, тверді речовини. Діапазон вимірювання визначається стійкістю матеріалу до нагрівання та можливістю поширення у матеріалі акустичних коливань. Теоретично лежить у межах від криогенних температур до  $\sim 10^4$  К, практично – у межах від криогенних температур до температури топлення вольфраму. Слід зазначити, що загалом акустичні методи вимірювання мають надзвичайно широкі можливості, які ще далеко не до кінця реалізовані [2-5].

Поширення хвилі у неперервному ізотропному середовищі, яке супроводжується певним збуренням,

описують рівнянням  $\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = \frac{1}{v_\phi^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2}$ , де

$W$  – загальне позначення будь-якої з таких величин, як густина, тиск, компоненти швидкості або зсуву;  $v_\phi$  – фазова швидкість;  $\tau$  – час. Вважається, що у газах та рідинах акустичні хвилі поширюються адіабатично у вигляді поздовжніх хвиль. Швидкість поширення акустичних хвиль в ідеальному газі:  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ , де  $\gamma = C_p/C_v$  – відношення теплоємностей за сталих тиску та об'єму;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура;  $M$  – молярна маса газу.

В ідеальних газах швидкість за заданої температури не залежить від тиску та збільшується пропорційно до  $\sqrt{T}$ , що є підґрунтям для створення газових акустичних термометрів. Формула вимірювання газового акустичного термометра для випадку ідеального газу:  $T = \frac{v^2 M}{\gamma R}$ , а чутливість такого термометра:  $\frac{dv}{v dT} = \frac{1}{2T}$ .

Швидкість у рідинах визначають за співвідношенням:  $v = \sqrt{\frac{K_{ad}}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta_{ad}}} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \beta_{is}}}$  де  $K_{ad}$  – адіабатичний модуль всебічної стисливості;  $\beta_{ad}$  – адіабатична стисливість;  $\beta_{is}$  – ізотермічна стисливість [5-6].

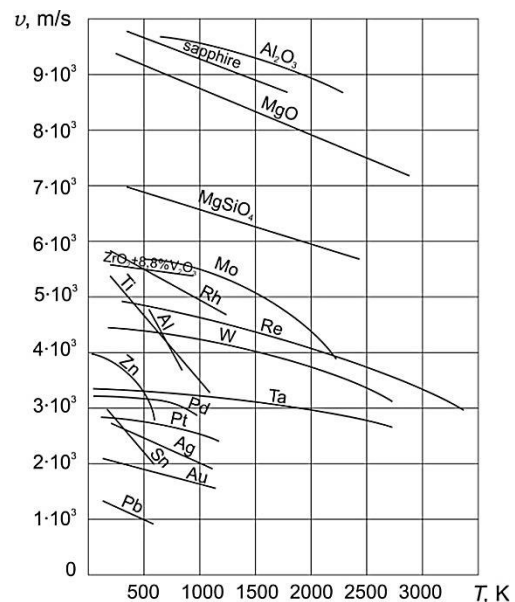


Рис.1 Температурні залежності швидкості поширення поздовжніх акустичних хвиль у твердих матеріалах.

Для ізотропних твердих матеріалів (рис.1) емпіричний вираз температурної залежності модуля пружності, який визначає температурну залежність швидкості:  $E = E_0 - bT \exp(-\frac{T_0}{T})$ , де  $E_0$ ,  $b$ ,  $T_0$  – сталі. Фазові

швидкості поздовжніх  $v_l$  та поперечних  $v_t$  хвиль для однорідного ізотропного середовища відповідно:

$$v_l = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}}; \quad v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$$

де  $K$  – модуль об’ємного стискання;  $G$  – модуль зсуву;  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – густина;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

В обмежених твердих тілах (пластинах, стрижнях), характеристики пружних хвиль складніші, ніж для безмежного середовища. У пластинах можуть поширюватися симетричні або антисиметричні хвилі Лемба, у стрижнях поширюються поздовжні, згинові та крутильні коливання. Фазова та групова швидкості поздовжньої хвилі у тонкому ( $d \ll \lambda$ ,  $d$  – діаметр стрижня,  $\lambda$  – довжина хвилі) стрижні  $v_{\phi} = v_{gp} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ .

Для крутильної хвилі вона дорівнює  $v_{\phi} = v_{gp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ .

Згинові хвилі у стрижнях характеризуються наявністю дисперсії, а їхня швидкість  $v_{z\phi} = \sqrt{\frac{EJ\omega^2}{\rho S}}$ , де  $J$  – момент інерції перерізу стрижня навколо осі;  $\omega$  – частота;  $S$  – площа перерізу.

### Методи і засоби вимірювання швидкості поширення акустичних сигналів.

У [8] запропоновано схему, в якій забезпечується вимірювання часового інтервалу між першим відбитим сигналом і сигналом багаторазового відбивання, що підвищує точність вимірювання. В іншому методі для підняття точності запропоновано вимірювати інтервал часу між центрами двох імпульсів [9]. Інтервал між імпульсами  $\tau_3$  заповнюється імпульсами квантування з частотою  $F_k$ , а самі тривалості імпульсів  $\tau_1$  та  $\tau_2$  заповнюються імпульсами квантування частотою  $F_k/2$ . Тоді часовий інтервал між сигналами становить  $\tau = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} + \tau_3$ . У [10] описано схему, де вимі-

рювання часового інтервалу здійснюється в два етапи. На першому реалізується грубий відлік міжімпульсного інтервалу, а на другому – вимірюється решта часового інтервалу між другим луна-сигналом і наступним за ним імпульсом квантування.

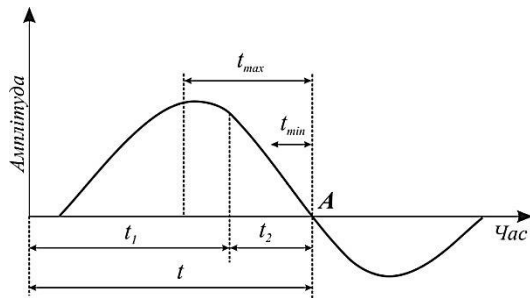


Рис.2. Принцип вимірювання часового інтервалу

У [11] описано метод, який ґрунтується на вимірюванні часового інтервалу в момент переходу сигналу через нульовий рівень. Суть методу полягає у тому,

що час, який минає до моменту переходу сигналу через нульову точку поділяють на дві частини  $t_1$  та  $t_2$  (рис.2). Тому точка А переходу через нуль з її характерним часом  $t_2$  розраховується за виразом:

$$\begin{cases} t_1^{(i)} = t_1^{(i-1)} + t_2^{(i-1)} - t_{max} & t_2^{(i-1)} > t_{max} \\ t_1^{(i)} = t_1^{(i-1)} + t_2^{(i-1)} - t_{min} & t_2^{(i-1)} < t_{min} \\ t_1^{(i)} = t_1^{(i-1)} & t_{min} \leq t_2^{(i-1)} \leq t_{max} \end{cases},$$

де  $t_{max}$  і  $t_{min}$  – константи,  $i=1, 2 \dots$

Нами удосконалено [12] метод, що дав змогу суттєво підвищити точність вимірювання часового інтервалу між імпульсами. Після моделювання акустичного імпульсного сигналу (рис.3) із застосуванням програми *Micro-Cap 7.0*, встановлено наступне: якщо апроксимувати ділянку сигналу в інтервалі точок X1...X10, то можна відшукати точку X переходу сигналу через нуль.

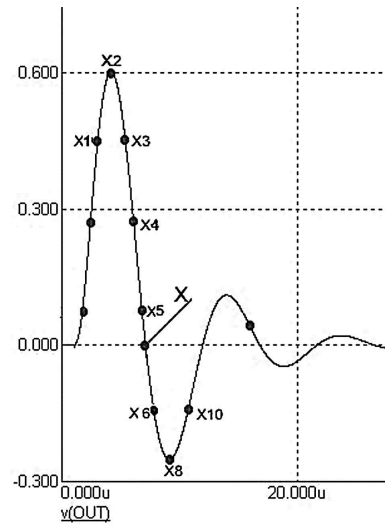


Рис.3. Модель акустичного імпульсного сигналу.

Для визначення точки переходу через нуль достатньо виконати апроксимацію для двох точок, які визначаються методом виявлення min/max значень і зміни знаку в кодах, а також у подальшому встановити адреси комірок пам’яті, в яких змінюється знак на протилежний, тобто реальний сигнал перетинає вісь X. За відомими значеннями точок визначаємо точку, де сигнал перетинає вісь X:  $X = X_5 + \frac{Y_5}{Y_5 + Y_6}$ . Далі за відомим часом перетворення АЦП визначаємо часовий інтервал поширення акустичного сигналу:  $\tau = t_{nep} \cdot X$ , де  $\tau$  – часовий інтервал,  $t_{nep}$  – час перетворення АЦП.

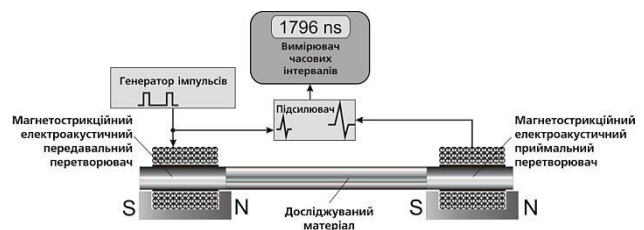


Рис.4. Структура акустичного каналу вимірювань.

Структура акустичного каналу вимірювань показана на рис.4. Для випромінювання та прийому акустичних імпульсів застосовано магнетострикційні перетворювачі зі сталем підмагнетчуванням та з нікелевим осердям, навінутим у формі стрижня тонкою оксидованою фольгою.

Основу устави для досліджень температурної залежності швидкості у матеріалах нікелевої групи становила високотемпературна рурчаста піч, в якій розташовували дослідний зразок з підключеними до нього 2-ма магнетострикційними перетворювачами (рис.5). Контроль температури здійснювався хромель-алюмелевими термоелектричними перетворювачами. На рис.5 показані два такі термоперетворювачі, але під час досліджень їх кількість сягала 5-ти для точнішого визначення розподілу температури за довжиною печі та її середнього значення.

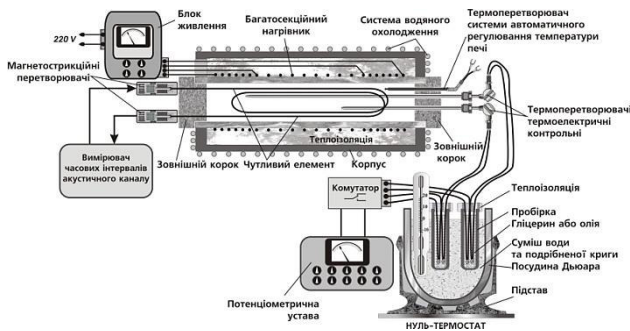


Рис.5. Схема устави для досліджень температурної залежності швидкості поширення акустичних імпульсів у стрижневих зразках

Експерименти проводилися у діапазоні температур 50...1000 ЕС для алюмелю та хромелю і в діапазоні температур 50...850 ЕС для копелю.

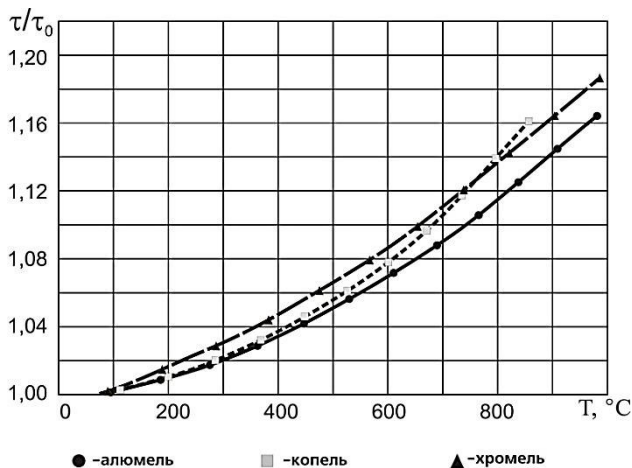


Рис.6. Температурні залежності часового інтервалу поширення акустичного сигналу крізь стрижневі зразки матеріалів.

Результати досліджень представлені на рис.6, як температурні залежності відносної зміни часового міжімпульсного інтервалу. Як видно, згаданим залежностям притаманний нелінійний характер, більш явно виражений у копелевих зразків. У процесі досліджень також відзначено зменшення амплітуди сигналу під час нагрівання вище від ~700 ЕС для алюмелю та хромелю і вище ~550 ЕС для копелю. Ці відмінності можна пояснити на підставі реологічної

теорії процесами переходу за зазначених температур від нерелаксованого модуля пружності до релаксованого модулю внаслідок впливу ефекту зернограничного проковзування за підвищених температур. Такий перехід спостерігається у всіх металів та сплавів у разі їх нагрівання до температур, вищих від ~50 % температури топлення [13].

### Висновки.

1. Під час експериментальних досліджень доведено ефективність підходу до вимірювання часового міжімпульсного інтервалу методом апроксимації ділянки між точками, які визначаються методом виявлення min/max значень та зміни знаку в кодах і подальшого встановлення адрес комірок пам'яті, в яких змінюється знак на протилежний, тобто реальний сигнал перетинає вісь X.

2. Виконані дослідження температурних залежностей швидкості поширення акустичного імпульсу у зразках таких матеріалів, як алюмель, хромель та копель, показали доцільність їх застосування для виготовлення чутливих елементів акустичних імпульсних та резонансних термометрів.

3. Встановлено, що за перевищення температури 550 ЕС (для копелю) та 700 ЕС (для алюмелю та хромелю) спостерігається посилення ступеню загасання сигналу (зменшення амплітуди), яке слід компенсувати відповідним збільшенням коефіцієнта підсилення сигналу у контрольованому діапазоні температур.

[1] Гук О.П. Кабельні первинні термоелектричні перетворювачі з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н.: спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин»/О.П. Гук. Львів, 2004. 20 с.

[2] Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела: Пер. с англ. / Под ред. И.Г. Михайлова и В.В. Леманова. М., 1972.

[3] Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. Вимірювання температури: теорія та практика. Львів: Бескід-Біт.- 2006

[4] Шестопал В.О. Реологические свойства чистых металлов при высоких температурах. М., 1978.

[5] Рохлин Л.Л. Акустические свойства легких сплавов. М., 1974.

[6] Lynnworth L.C. Use of ultrasonics for high-temperature measurement//Materials evaluation. 1969. Vol.27. №7. P.60–66.

[7] Lynnworth L.C., Benes J.J. Measuring temperature // Machine Design. 1969. N T–26. P.190–193.

[8] А. с. 523308 СССР, МКИ G01 K11/24. Ультразвуковой измеритель температуры/ А. С. Абрамов, В. Г. Вигдорчик и др.// Открытия. Изобретения. 1976. №28.

[9] Пат. 3717033 США, МКИ G01k11/24 Ultrasonic Apparatus Particularly for Thermometry/ В.М. Gordon et al. Оpubл. 20.02.1973.

[10] А.с. 1397751 СССР МКИ П01 K11/24 Ультразвуковой измеритель температуры / Б.И. Стадник, Я.Т. Луцик, И.С. Лихновский и др. // Открытия. Изобретения. 1988. №19.

[11] Mi X.B., Zhang S.Y. et al. Automatic Ultrasonic Thermometry // 15th Symposium on Thermophysical Properties. – 2003.

[12] Zalutskaya T., Likhnovsky I., Lutsyk Ya. An investigation of the acoustic properties of materials for ultrasonic thermometry // Measurement Techniques.- Thermal Measurement - Vol.55. – No 6. - September 2012.

[13] Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. М., 1978.