

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНТАКТНИХ ТЕПЛОВИХ ОПОРІВ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

© Пістун Є.П., Васильківський І.С., Юсик Я.П., 1998

Державний університет "Львівська політехніка"

Дана стаття пояснює вплив контактних теплових опорів (КТО) на точність вимірювання теплопровідності. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження КТО, проаналізований вплив КТО на результат вимірювання, а також, з метою підвищення точності за рахунок усунення впливу КТО на результат вимірювання теплопровідності, запропонований прилад для вимірювання теплопровідності матеріалів і виробів у діапазоні від 10 до 400 Вт/(м·К) на основі нової зрівноваженої мостової теплової вимірювальної схеми.

У відомих розробках теплофізичних приладів недостатньо уваги приділено впливові різних неінформативних параметрів на результат вимірювання, зокрема КТО, внаслідок чого прилади не забезпечували високої точності вимірювання. У зв'язку з цим виникла ціла низка задач: визначення КТО, дослідження їх впливу на точність вимірювання, а також побудова приладів для вимірювання теплопровідності на основі проведених досліджень з метою компенсації цього впливу.

Авторами статті проведені теоретичні і експериментальні дослідження КТО, проаналізований їх вплив на результат вимірювання теплопровідності різних матеріалів, а також розроблені прилади для вимірювання теплопровідності на основі цих досліджень.

КТО виникають у теплопровідних колах між поверхнями різних зразків матеріалів. Їх значення залежить від характеру контактуючих матеріалів, середовища, що заповнює область між зразками, а також від чистоти обробки контактуючих поверхонь.

Існує емпірична формула для наближеного визначення питомої провідності контакту [1]

$$\alpha_k = \alpha_c + \alpha_m = \frac{\lambda_c \cdot Y}{2(h_1 + h_2)} + 8 \cdot 10^3 \cdot \bar{\lambda}_m \cdot \left(\frac{p \cdot k}{3 \cdot \sigma_B} \right)^{0,86}, \quad (1)$$

де $\bar{\lambda}_m = 2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$; λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності відповідно для кожного матеріалу контактуючої пари; h_1, h_2 – середні висоти мікронерівностей контактуючих поверхонь, що відповідають класові чистоти обробки; λ_c – теплопровідність середовища, яке заповнює контактну зону; p – контактний тиск; σ_B – границя міцності для більш еластичного матеріалу;

Y – відносне значення зазору, яке приймають для шліфованих поверхонь при нормальних умовах таким, що дорівнює 3,33; $k = (15 \cdot 10^{-6}) / (h_1 + h_2)$ для $h_1 + h_2 \leq 10$ мкм; α_m – тепла провідність фактичного контакту.

Для визначення КТО використана така формула:

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k \cdot S}, \quad (2)$$

де S – площа контакту досліджуваної пари.

Розрахунок КТО за формулами (1) та (2) може призвести до значних похибок вимірювань, оскільки залежність КТО від масштабного та температурного чинників не досліджена. Крім того не досліджена така залежність при грубій обробці контактуючих поверхонь. Тому, у даний час, вивчення КТО при різних параметрах контактуючих поверхонь і навколишнього середовища є актуальним [2].

З цією метою розроблені пристрої для вимірювання КТО з високою точністю [3-5]. Принципова схема одного із таких пристроїв [5] показана на рис. 1.

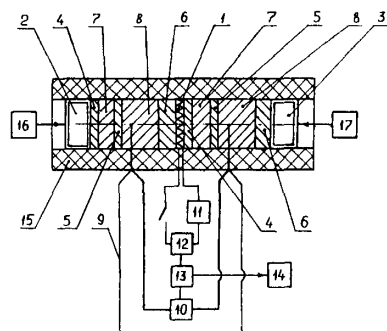


Рис. 1. Принципова схема пристрою для визначення КТО.

Прилад складається з джерела тепла (електронагрівача) 1, приймачів тепла 2, 3, між якими розміщені два пакети досліджуваних зразків, кожен з яких складається з трьох зразків першого типу 4, 5, 6 та двох зразків другого типу 7, 8. У досліджувані зразки 8 вмонтовано спай диференційної термопари 9, яка під'єднана до вторинного приладу 10. Джерело тепла ввімкнуте в коло джерела струму 11 разом з ватметром 12, який вимірює потужність тепла, що виділяється. При цьому, сигнали з вторинного приладу 10 і ватметра 12 надходять на вимірювач співвідношення 13, до виходу якого під'єднаний індикатор 14, який реєструє шукане значення. Для зменшення теплових втрат елементи пристрою захищені теплоізоляцією 15. Пакети зразків стискаються механізмами 16 і 17.

Розрахункові співвідношення можна отримати так.

Згідно з даним методом різницю температур вимірюють між точками на осях різних пакетів зразків, які вибирають так, щоб між джерелом тепла і точками вимірювання температури сумарна товщина зразків першого типу і сумарна товщина зразків другого типу були, відповідно, однаковими, а кількість контактів зразків між собою не була однаковою, для різних пакетів зразків.

Розглянемо перший пакет зразків (на рис. 1 – ліворуч від джерела тепла). Температура, вимірювана в ньому спаєм термопари, рівна:

$$T'_a = T_{H1} - F_1(R'_k + R'_l + R_k + R'_{II} + R_T), \quad (3)$$

де T_a – вимірювана температура; T_{H1} – температура джерела тепла; F_1 – тепловий потік, що проходить через даний пакет зразків; R'_k – КТО між джерелом тепла і контактуючим з ним взірцем; R'_l – тепловий опір товстішого зразка першого типу; R_k – КТО між зразками різних типів; R'_{II} – тепловий опір шару товстішого зразка другого типу між областю контакту цього зразка з товстішим зразком першого типу і точкою вимірювання температури; R_T – КТО між зразком і вмонтованим у нього давачем температури.

Для другого пакета зразків (рис. 1 – праворуч від джерела тепла) аналогічно запишемо, що

$$T'_a = T_{H2} - F_2(R'_k + R_l + R_k + R_{II} + R_k + R_l + R_k + R''_{II} + R_T), \quad (4)$$

де, крім відомих, T'_a – вимірювана температура; T_{H2} – температура джерела тепла; F_2 – тепловий

потік, що проходить через даний пакет зразків; R_l – тепловий опір менш товстого зразка першого типу; R_{II} – тепловий опір менш товстого зразка другого типу; R''_{II} – тепловий опір шару товстішого зразка другого типу між областю контакту цього зразка з менш товстим зразком першого типу і точкою вимірювання температури.

Оскільки теплові опори обох пакетів зразків дорівнюють один одному і температури приймачів тепла однакові, то

$$F_1 = F_2 = F = W / 2, \quad (5)$$

де W – тепла потужність, яка виділяється на джерелі тепла.

Крім того, враховуючи, що пакети зразків складають так, щоб між джерелом тепла і точками вимірювання температури сумарна товщина шарів зразків першого типу і сумарна товщина шарів зразків другого типу були, відповідно, однакові для різних пакетів зразків, можна записати, що

$$R'_l + R'_{II} = R_l + R_{II} + R_l + R''_{II}, \quad (6)$$

тобто, сумарні теплові опори зразків першого і другого типів, що знаходяться між джерелом тепла і точками замірів температури, однакові для обох пакетів.

Виходячи з умов (5), (6) віднімаємо (1) від (2) і отримуємо

$$T'_a - T_a = F \cdot 2R_k. \quad (7)$$

Остаточо запишемо

$$R_k = \frac{T_b - T_a}{2F} = \frac{T_b - T_a}{W}. \quad (8)$$

Шукане значення КТО, зчитуємо після стабілізації режиму теплопередачі, безпосередньо з індикатора 14.

Дослідження КТО між різними матеріалами, проведені на даному пристрої, засвідчили, що їх значення коливається в межах від 9,1 до 1,7 К/Вт, при відсутності змащування на контактуючих поверхнях, і від 3,9 до 0,5 К/Вт, при змащуванні контактуючих поверхонь маслом ПФМС-4.

Знехтувати впливом КТО на результат вимірювання при визначенні коефіцієнта теплопровідності різних матеріалів (особливо високо-теплопровідних) не можна, оскільки він співрозмірний з тепловими опорами досліджуваного та еталонного зразків. Так, наприклад, проведення досліджень без врахування впливу КТО матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda > 10$ Вт/(м·К) призведе до похибки вимірювань 15 % та більше.

З метою усунення впливу КТО на результат вимірювання теплопровідності авторами статті розроблено прилад для вимірювання теплопровідності матеріалів і виробів у діапазоні від 10 до 400 Вт/(м·К) на основі нової зрівноваженої мостової теплової вимірювальної схеми [6]. Принципова схема приладу показана на рис.2.

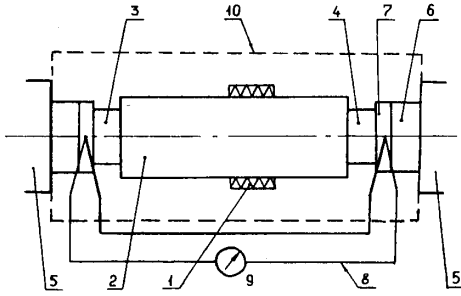


Рис.2. Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності матеріалів.

Прилад складається з джерела тепла (електронагрівача) 1, розміщеного на теплопровідному елементі 2 з можливістю переміщення вздовж його осі. Досліджуваний зразок 3 і еталонний зразок 4 притискають до торців елемента 2 за допомогою приймачів тепла 5, до яких приклеєні однакові теплові опори 6 і температуровирівнюючі пластини 7. У пластини 7 вмонтовані спай диференційної термопари 8, яка під'єднана до нуль-індикатора 9. Елементи приладу захищені від теплообміну з навколишнім середовищем теплоізоляційним корпусом 10.

Вимірювання шуканого значення теплопровідності досліджуваного зразка здійснюють у стаціонарному тепловому режимі, коли теплові потоки, що проходять через зразки, дорівнюють один одному. Ці теплові потоки вимірюють за допомогою двох однакових теплових опорів 6. Рівності теплових потоків домагаються переміщенням джерела тепла 1 вздовж осі теплопровідного елемента 2 та фіксують його за рівністю нулю сигналу диференційної термопари 8, оскільки в цей момент перепади температур на зразках 6 однакові. При цьому, враховуючи, що перепади температур між нагрівачем 1 і приймачем тепла однакові, сумарні теплові опори елементів теплопровідного кола, що знаходяться по обидві сторони від місця підводу тепла, однакові.

Шукане значення розраховують за формулою

$$\lambda_x = \frac{\delta_x}{S_x \left(\frac{\delta_e}{\lambda_e \cdot S_e} + \frac{2 \cdot \Delta l}{\lambda_T \cdot S_T} \right)}, \quad (9)$$

де δ_x, λ_x, S_x - відповідно товщина, коефіцієнт теплопровідності і площа поперечного перерізу досліджуваного зразка; δ_e, λ_e, S_e - те ж, для еталонного зразка; λ_T, S_T - відповідно коефіцієнт теплопровідності і площа поперечного перерізу теплопровідного елемента; Δl - відхилення джерела тепла від середини теплопровідного елемента при зрівноваженні вимірювальної схеми.

Проаналізуємо роботу даного приладу, схема з'єднання теплових опорів якого подана на рис.3.

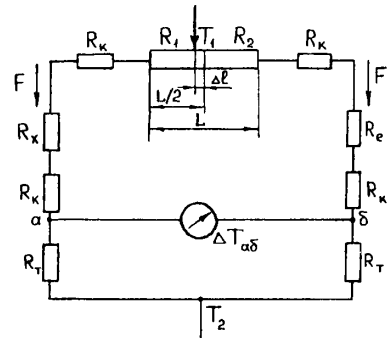


Рис.3. Схема з'єднання теплових опорів приладу для вимірювання теплопровідності матеріалів.

При рівновазі вимірювальної схеми, тобто при $\Delta T_{\alpha\beta} = 0$, можна записати вираз

$$R_1 + R_k + R_x + R_k = R_2 + R_k + R_e + R_k. \quad (10)$$

Після нескладних перетворень

$$R_x = R_e + R_2 - R_1. \quad (11)$$

Оскільки в загальному випадку $R = \lambda \frac{\delta}{S}$, де δ, λ, S - відповідно товщина, коефіцієнт теплопровідності, площа поперечного перерізу зразка, то після перетворень (11) ми отримуємо(9).

Отже, аналіз математичної моделі даної схеми свідчить, що шукане значення λ_x не залежить від впливу КТО.

Проведені дослідження метрологічних характеристик розробленого приладу в діапазоні температур від 270 до 370 К показали, що границя допустимої основної похибки вимірювання, при довірчій ймовірності 0,95, змінюється від 10 % - для досліджуваних зразків з тепловим опором 0,5 К/Вт, до 3,3 % - для зразків з тепловим опором 4 К/Вт.

1. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М., 1977.
 2. Белов Е.А., Курепин В.В. Влияние контактного термического сопротивления в методах неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Машины и аппараты холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха: Межвуз. сб. науч. тр. Л., 1981. 3. А. с. 1413499 СССР. Способ определения контактного термического сопротивления /И.С.Василькивский, Е.П.Пистун, Я.Т.Рогоцкий // Открытия. Изобрет. 1988. № 28.

4. А. с. 1476364 СССР. Способ измерения контактного термического сопротивления /Е.П.Пистун, И.С.Василькивский // Открытия. Изобрет. 1989. № 16.
 5. А. с. 1582101 СССР. Способ измерения контактного термического сопротивления разнородных материалов /Е.П.Пистун, И.С.Василькивский // Открытия. Изобрет. 1990. № 28. 6. А. с. 1536969 СССР. Способ измерения теплопроводности вещества /Е.П.Пистун, И.С.Василькивский, Я.Т.Рогоцкий, Я.П.Юсык // Открытия. Изобрет. 1989. № 36.

УДК 622.276.054.22(047)

ВДОСКОНАЛЕННЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ "УЕВН-КНКТ"

© Зікратий С.В., 1998

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Описана математична діагностична модель, яка дає змогу моделювати дефекти установок електровідцентрових насосів для видобутку нафти.

У роботі [1] розглянута модель установки електровідцентрових насосів для видобутку нафти з колоною насосно-компресорних труб – система "УЕВН-КНКТ" у вигляді стержнів з'єднаних між собою за допомогою зв'язків, які характеризуються деякими жорсткостями на кручення та видовження. Модель дає можливість за зміною крутного моменту оцінити значення крутильних та поздовжніх коливань, які є діагностичними ознаками стану системи, але не дозволяє виявити тип дефекту, що призвів до зміни крутного моменту.

У процесі експлуатації УЕВН змінюється форма поперечного перерізу елементів системи (проявляється еліптичність при зношуванні підшипників, порушується умова співвісності насоса і двигуна тощо), що призводить до зміни значення моментів інерції, які впливають на розв'язок системи [1]. Отже, змінюючи моменти інерції можна моделювати такі дефекти, як зношування робочих органів насоса, зношування підшипників ротора двигуна, дисбаланс ротора ЗЕД, гідравлічну незрівноваженість вала насоса. При цьому зміна моментів інерції враховується на підставі наступних співвідношень.

Момент інерції I_z просторової області V (рис.1), заповненої масою з густиною ρ щодо осі z обчислюється за такою формулою [2]

$$I_z = \iiint_V (x^2 + y^2) \rho dV, \quad (1)$$

де

$$\begin{cases} x = x(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \\ y = y(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \\ z = z(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \end{cases} \quad (2)$$

функції, що параметризують область V , яку займає тіло. Тому для подальших обчислень доцільно визначити аналітичну структуру вказаних функцій.

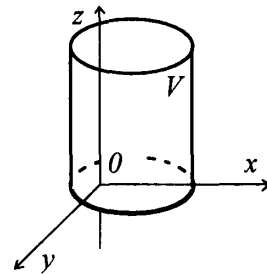


Рис.1. Моменти інерції просторової області.

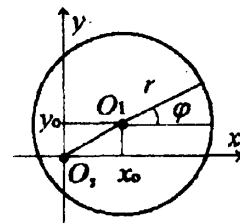


Рис.2. Циліндр із зміщеною віссю обертання.

Випадок А: Циліндр із зміщеною віссю обертання, що характерно при дисбалансі ротора двигуна (рис.2). Розглянемо перетин циліндра площиною $z=const$. Точка O_z – точка на осі обертання, O_1 – центр перетину. Радіус R , висота H циліндра вважаються відомими. Якщо осі O_x та O_y ,