

Stanisław JĘDRZEJOWSKI, Tadeusz KAPUSTA

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I CHŁODNICTWA

Pomiary szybkozmiennych temperatur przy użyciu termoelementów typu erozyjnego

Dr inż. Stanisław JĘDRZEJOWSKI

Studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej ukończył w 1970 roku. W 1980 r. uzyskał stopień doktora. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Techniki Ciepłej i Chłodnictwa Politechniki Łódzkiej. Główne zainteresowania naukowe to badania niustalonych procesów wymiany ciepła.



Dr inż. Tadeusz KAPUSTA

Ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej w 1979 roku. W roku 1989 uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Pracuje w Katedrze Techniki Ciepłej i Chłodnictwa Politechniki Łódzkiej.



Streszczenie

W pracy przedstawiono zastosowanie termoelementów erozyjnych do pomiarów szybkozmiennych temperatur na powierzchni wymieniającej ciepło. Pomiary te posłużyły do obliczeń gęstości lokalnego strumienia ciepła na tej powierzchni. Przeprowadzone pomiary i obliczenia wykazały przydatność tego typu czujników do badań niustalanej wymiany ciepła wewnątrz cylindra maszyny tłokowej.

Abstract

Summary. In the paper an application of eroding thermocouples for transient temperature measurements is presented. Recorded surface temperatures were used for calculation of a local heat flux on the surface. Experiments done showed usefulness of the eroding thermocouples for transient heat transfer investigations.

1. Wstęp

Wymiana ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym a ściankami cylindra we współczesnych maszynach tłokowych jest bardzo intensywne. Wynika to z faktu stosowania intensywnego zawirowania ładunku przy jego wprowadzaniu do cylindra, istnienia dużej burzliwości czynnika wywołanej ruchem tłoka jak i znacznych różnic temperatur między czynnikiem a ściankami. Poznanie warunków wymiany ciepła w cylindrze jest jednym z elementów niezbędnych do zbudowania termodynamicznego modelu zachodzących procesów. Model taki umożliwiłby, już na etapie projektowania, określenie ilości wymienianego ciepła, temperatury czynnika i ścianek oraz zmian tych parametrów w czasie.

Zastosowanie termoelementów powierzchniowych umożliwiło pomiar miejscowych wartości strumienia ciepła. Polega on na rejestracji zmian lokalnych temperatur na powierzchni wymieniającej ciepło, a następnie poprzez rozwiązanie zagadnienia niustalonego przewodzenia ciepła w ciele stałym obliczenie strumienia wymienianego ciepła. Warunkiem prawidłowego pomiaru jest aby mocowany na badanej powierzchni czujnik nie zmieniał przebiegu procesu wymiany ciepła oraz pola temperatury wewnątrz ścianki. Dokonuje się to przez odpowiednią zabudowę czujnika i dobór materiałów o własnościach cieplnych zbliżonych do własności ścianki, na której wykonywany jest pomiar.

Otrzymane w ten sposób funkcje temperatury w czasie posłużą jako dane wejściowe do obliczeń pól temperatur w ściance. Ze względu na znaczną pojemność cieplną metalowych elementów

konstrukcyjnych i dużą szybkość zmian parametrów czynnika omywającego ściankę głębokość wnikania fali temperatur jest niewielka. Modelem przyjmowanym do rozwiązywania tego zagadnienia jest model ciała półnieskończonego.

2. Termoelementy powierzchniowe typu erozyjnego

Amerykańska firma NANMAC Corporation (Framingham, MA), specjalizująca się w budowie różnego typu termometrów termoelektrycznych opracowała technologię bardzo szybkich czujników do pomiarów temperatury powierzchni ciał stałych [4]. Na podstawie tej technologii produkuje wiele rodzajów czujników, różniących się materiałami i wykonaniem. Zasada ich budowy jest podobna. Wewnątrz płaszczki umieszczone są dwie elektrody tworzące ogniwo termoelektryczne. Elektrody te są izolowane od siebie i płaszczka warstwą dielektryka. Złącze powstaje na skutek mechanicznej erozji materiału elektrod podczas szlifowania czoła czujnika papierem ściernym. Złącze jest bardzo cienkie i posiada małą bezwładność cieplną. Według materiałów firmowych czas odpowiedzi na skokową zmianę temperatury jest rzędu 10μs. Ze względu na metodę formowania złącza termoelementy te nazywane są erozyjnymi (ang. eroding thermocouples). Czujniki mogą być stosowane w bardzo szerokim zakresie temperatur; od kriogenicznych (-200°C i niższej) aż do 2750°C, w zależności od zastosowanych materiałów na elektrody i płaszcz. Konstrukcja mechaniczna jest również bardzo wytrzymała. Dopuszczalne ciśnienia pracy wynoszą od 20 do 180MPa.

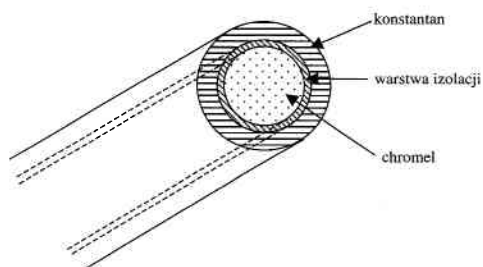
Termoelementy erozyjne dostarczane są przez producenta z uformowanym złączem. Posiada ono dobrą odporność na czynniki zewnętrzne. Jeśli jednak zostanie uszkodzone, utlenione lub zabrudzone, to wykonanie nowego nie przedstawia trudności. Czoło czujnika należy wstępnie oczyścić jakąkolwiek substancją ścierną. Najlepsze wyniki osiąga się, gdy proces czyszczenia przeprowadza się pod kątem 45° do przekładki izolacyjnej pomiędzy elektrodami. Następnie na twardej i gładkiej powierzchni należy położyć arkusz papieru ściernego o granulacji 80. Utrzymując termoelement prostopadle do powierzchni należy przecierać czoło czujnika poprzecznie do warstwy izolacyjnej.

Proces ten powinien być powtórzony kilkakrotnie lecz tylko w jednym kierunku. Okresowo sprawdzać rezystancję złącza, aż uzyska się stała wartość o 2-10Ω większą od rezystancji samych wyprowadzeń. Należy zwrócić uwagę, że w czasie szlifowania czujnik nagrzewa się i może to być przyczyną błędnych pomiarów. Stabilne odczyty świadczą o prawidłowym uformowaniu złącza.

W ten prosty sposób można uzyskać czas odpowiedzi termoelementu ok. 10 milisekund na skokową zmianę temperatury.

Jeśli wymagane jest uzyskanie jeszcze krótszego czasu odpowiedzi proces szlifowania należy przeprowadzić papierem ściernym o drobniejszej ziarnistości (280÷320). Rezystancja złącza jest wtedy większa i wynosi 8÷12Ω. Należy uważać przy tym, aby nie zerwać połączenia. Jeśli to nastąpi, czynności powtarza się zwiększając odpowiednio ziarnistość papieru. W ten sposób uzyskać można czasy odpowiedzi czujnika rzędu mikrosekund. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że naniesienie na złącze jakichkolwiek obcych substancji pogarsza jego własności dynamiczne. Nawet warstewka tłuszczu pozostająca po dotknięciu palcami ma wpływ na czujnik.

Pomiary niustalanej wymiany ciepła wykonano przy pomocy czujnika prętowego (ang. pencil probe) typu E15-7-E (rys. 1) o średnicy 1,6 mm. Jedną elektrodę stanowi rdzeń wykonany z chromelu, drugą zaś płaszcz z konstantanu. Elektrody rozdzielone są cienką warstwą izolacji. Metale użyte do budowy czujnika tworzą termoelement typu E, charakteryzujący się dużą siłą termoelektryczną (6,317 mV/100 K). Może on pracować przy temperaturach od -200° do +1000°C, w atmosferze obojętnej lub utleniającej. Dopuszczalne ciśnienie pracy 72 MPa. Czujniki te posiadają praktycznie nieograniczoną żywotność.



Rys. 1. Schemat budowy termoelementu erozyjnego.

Czujnik termoelektryczny został wstawiony w otwór tak, aby spina pomiarowa leżała w płaszczyźnie powierzchni płyty. Otwór rozwiercono na rozmiar zapewniający dobry kontakt cieplny płaszczka czujnika i płyty. Od zewnątrz czujnik zaciśnięty jest w otworze przy pomocy uszczelki gumowej i zakrętki.

3. Tor pomiaru temperatury

Przyrosty temperatury powierzchni ścianki metalowej pod wpływem działania niustalonego strumienia ciepła są małe, nawet jeśli strumień osiąga znaczne wartości. W warunkach wymiany ciepła w cylindrze maszyny tłokowej przyrosty te wynoszą od części do dwóch stopni. Zależą one także od szybkości zachodzących procesów. Im są szybsze tym zmiany temperatury są mniejsze. Wynika to ze znacznej pojemności cieplnej materiału ścianki. W przypadku występowania procesów spalania przyrosty temperatury są większe i mogą dochodzić do kilku stopni.

Przy tak niewielkich przyrostach temperatury sygnały pomiarowe czujników są bardzo małe, na poziomie 100μV. W przypadku procesów stacjonarnych pomiar małych, ustalonych w czasie, napięcie nie stanowi większego problemu i może być dokonany z dużą dokładnością. Badania procesów szybkozmiennych wymaga zastosowania precyzyjnych wzmacniaczy o dużym wzmocnieniu i dostatecznie szerokim paśmie przenoszenia. Muszą się odznaczać stabilnością pracy (dryft temperaturowy) i małym poziomem szumów. Szczególnie własności szumowe są istotne dla wzmacniaczy prądu stałego przy jednoczesnym wymogu dużego wzmocnienia szerokiego pasma. O jakości całego toru pomiarowego decydują parametry pierwszych stopni wzmacniających.

Typowym zakresem pomiarowym przetworników analogowo-cyfrowych, stosowanych w układach akwizycji danych, jest

0÷10V dla sygnałów unipolarnych i -10V÷+10V dla bipolarnych. Całkowite wzmocnienie toru pomiarowego powinno wynosić zatem 10⁵. Podstawową część wzmocnienia zrealizowano w przedwzmacniaczu składającego się z dwóch układów INA110AG (Burr-Brown). Są to precyzyjne wzmacniacze instrumentalne o regulowanym skokowo wzmocnieniu. Analizując dane techniczne tych wzmacniaczy zdecydowano ustawić wzmocnienie każdego z nich na 100. Nie jest to wzmocnienie duże i w tych warunkach posiada on bardzo dobre własności: błąd wzmocnienia 0,02%, nieliniowość 0,004, czas ustalania 3μs przy niedokładności 0,1%, dryft temperaturowy 0,05÷1μV/K. Całkowite wzmocnienie przedwzmacniacza wynosi zatem 10⁴. Pomiedzy wzmacniacze wstawiono filtr dolnoprzepustowy RC o częstotliwości granicznej 5kHz. Ma to na celu ograniczenie pasma przepustowości i zmniejszenia poziomu szumów na wyjściu.

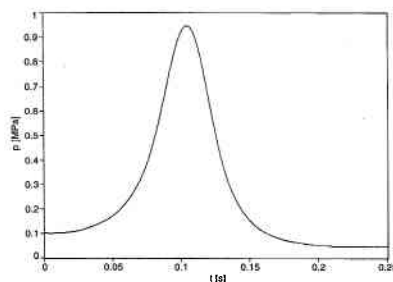
W celu zminimalizowania wpływu zakłóceń zewnętrznych przedwzmacniacz został starannie zaekranowany i uziemiony. Ekranowane są również przewody łączące czujniki z wejściami wzmacniacza. Do zasilania wzmacniaczy (±15V) użyto przetwornicy DC-DC (prąd stały – prąd stały) zasilanej napięciem +5V ze stabilizatora napięcia stałego. Ma to na celu odcięcie drogi przenikania zakłóceń od strony sieci elektrycznej. Częstotliwość pracy przetwornicy (ok. 100kHz) leży daleko poza pasmem przepustowym wzmacniacza i napięcia zasilające mogą być dokładnie odfiltrowane.

Sygnały pomiarowe z przedwzmacniacza kierowane są do układu akwizycji danych. W zależności od potrzeb są one dodatkowo wzmacniane (maksimum kilkanaście razy). Równoległe do układu akwizycji danych dołączony jest oscyloskop umożliwiający bieżący podgląd mierzonych wielkości.

Czujniki termoelektryczne przyłączane są bezpośrednio do zaskoków wejściowych wzmacniacza. Nie stosuje się tu przewodów kompensacyjnych i układu „zimnych końców”. Temperaturą odniesienia jest temperatura otoczenia a rolę spiny odniesienia spełnia połączenie końcówek czujnika z miedzianymi przewodami łączącymi ze wzmacniaczem. Przy krótkich czasach badanych procesów temperatura spiny odniesienia nie ulega zmianie, a korzystając z układu kompensacji nierównoważenia wzmacniacza można uzyskać zerowy sygnał wyjściowy dla szerokiego zakresu temperatur. Jest to bardzo istotne, gdyż przy bardzo dużym wzmocnieniu istnieje możliwość przesterowania wzmacniacza.

4. Pomiary

Zbudowane stanowisko pomiarowe umożliwia przeprowadzenie eksperymentów związanych z testowaniem czujników i opracowaniem metod badawczych dotyczących szybkozmiennych procesów wymiany ciepła. Niustalona wymiana ciepła jest tutaj wymuszona szybkim sprężeniem i rozprężeniem gazu. Wraz ze zmianami ciśnienia zmienia się temperatura czynnika. Jednocześnie ruch tłoka wywołuje pewną jego burzliwość. Charakterystyczną cechą stanowiska jest możliwość realizacji pojedynczego cyklu, rozpoczynającego się przy znanych i jednoznacznie określonych warunkach po-



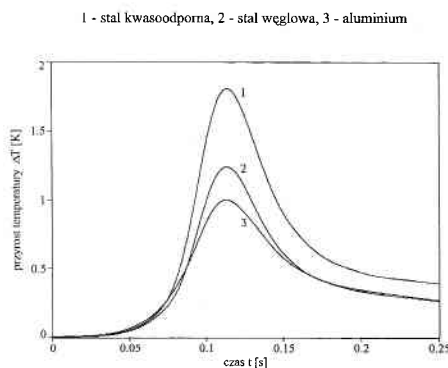
Rys. 2. Przebieg ciśnienia w czasie cyklu pomiarowego.

czątkowych. Dotyczy to zarówno temperatury gazu jak i ścianek otaczających komorę sprężania.

Pomiary wykonano stosując ten sam cykl sprężania i rozprężania powietrza w cylindrze. Na rys. 2 przedstawiono przebieg ciśnienia gazu w cylindrze w czasie pojedynczego cyklu.

5. Wyniki pomiarów

Na rys. 3 przedstawiono wyniki pomiarów zmiany temperatury na powierzchni płyty zamykającej cylinder wykonanej z trzech różnych materiałów: stali węglowej (0,15% C), stali kwasoodpornej (18% Cr, 8% Ni) oraz aluminium. Zróżnicowanie wyników związane jest z różnicami własności cieplnych użytych materiałów. Im przewodność i dyfuzyjność cieplna jest większa tym przyrost temperatury mniejszy.



Rys. 3. Przyrosty temperatury powierzchni wymieniającej ciepło.

Zarejestrowane przyrosty temperatury umożliwiają obliczenie lokalnego strumienia ciepła działającego na badanej powierzchni, stosując model jednowymiarowego nieustalonego przewodzenia ciepła w płycie półnieskończonej przy zmiennym w czasie warunku brzegowym [1, 5]. Jeżeli $T(\tau)$ jest funkcją temperatury powierzchni w czasie to gęstość strumienia wymienionego ciepła q w chwili t jest wyrażona równaniem [2]:

$$q(t) = \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{dT}{d\tau} d\tau \quad (1)$$

gdzie: λ – przewodność cieplna,
 ρ – gęstość,
 c – ciepło właściwe,
 t – czas.

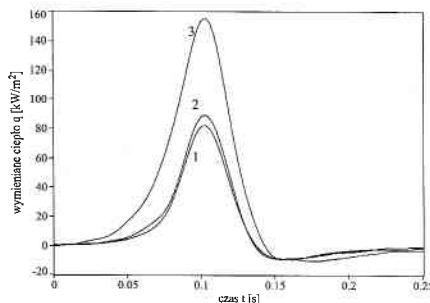
Równanie może być rozwiązane, jeśli funkcja $T(\tau)$ jest znana. W badaniach eksperymentalnych używane są układy akwizycji danych, które rejestrują zadane wielkości w postaci ciągu dyskretnych wartości. Zwykle pomiary robione są ze stałym krokiem czasowym Δt a zatem czas w chwili i jest równy $t_i = i \Delta t$. Przybliżając pochodną temperatury po czasie w danym kroku i przez iloraz różnicowy $\Delta T_i / \Delta \tau$ i rozwiązując całkę w równaniu otrzymuje się formułę wygodną do numerycznych obliczeń lokalnej wartości gęstości strumienia ciepła:

$$q(t_n) = 2 \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi \Delta t}} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{i-1}) (\sqrt{n-i+1} - \sqrt{n-i}) \quad (2)$$

Rys. 4 pokazuje wyniki obliczeń gęstości lokalnego strumienia ciepła. Widoczna jest bardzo dobra zgodność wyników otrzymanych dla stali węglowej i kwasoodpornej. Własności termofizyczne tych materiałów są zbliżone do własności materiałów, z których wykonany jest termoelement. Dlatego zabudowanie czujnika nie powoduje istotnych zmian w polu temperatury w ściance [3].

Dla płyty aluminiowej otrzymany wynik jest ok. dwa razy większy niż dla stali. Wynika to z faktu, że przewodność i dyfuzyjność

1 - stal kwasoodporna, 2 - stal węglowa, 3 - aluminium



Rys. 4. Obliczona gęstość lokalnego strumienia ciepła.

cieplna aluminium jest znacznie większa od materiałów termoelementu. Wprowadzenie czujnika do ścianki aluminiowej znacznie zakłóca pole temperatury w płycie i model jednowymiarowego przewodzenia ciepła nie może być stosowany.

6. Wnioski

Przeprowadzone pomiary wykazały przydatność termoelementów erozyjnych do pomiarów szybkozmiennych temperatur na powierzchni wymieniającej ciepło oraz do obliczeń lokalnej wartości gęstości strumienia ciepła. Dla metali o niezbyt dużej przewodności i dyfuzyjności cieplnej (np. stali węglowe i nierdzewne) można przyjmować, że termoelement mierzy rzeczywistą temperaturę powierzchni. Instalacja czujnika w ściance, ze względu na zbliżone własności cieplne materiałów użytych do budowy czujnika i ścianki, nie powoduje odkształceń pola temperatury.

Dla materiałów o znacznie większych wartościach przewodności i dyfuzyjności cieplnej występuje wyraźne odkształcenie pola temperatury w pobliżu miejsca montażu i pomiary stają się niemiernodajne. W takich przypadkach należy stosować przekładkę izolacyjną ograniczającą poprzeczny przepływ ciepła. Czujnik pracuje wtedy w warunkach zbliżonych do jednokierunkowego przepływu ciepła wzdłuż jego osi i wskazuje niezaburzoną temperaturę swojego czoła. Dla tego przypadku do obliczeń strumienia ciepła należy przyjmować zastępcze wartości parametrów cieplnych termoelementu. Przyjęcie własności jak dla stali nierdzewnej daje dobre przybliżenie.

Praca powyższa powstała w ramach realizacji projektu badawczego nr 0091/T12/99 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

Literatura

- [1] Carslaw H.S. & Jaeger J.C., *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, Oxford, 1959.
- [2] Hall G.J. & Herzberg A., *Recent advances in transient Temperature Thermometry*, Jet Propulsion, 11, pp. 719-723, 1958.
- [3] Jędrzejowski S. & Kapusta T., *Wpływ własności cieplnych materiału ścianki na pomiary lokalnego strumienia ciepła przy pomocy termoelementu powierzchniowego*. X Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Świeradów Zdrój, 1998.
- [4] Nanmac, *Temperature measurement handbook*, Vol. VIII. Catalogue and application notes edited by Nanmac Corporation, Framingham, Massachusetts, USA.
- [5] Wiśniewski S., *Wymiana ciepła*, PWN, Warszawa, 1979.