

WYZNACZANIE WARUNKU
BRZEGOWEGO PODCZAS
NAGRZEWANIA PRĘTA
W KOMORZE PIECA

Oznaczenia:

T_a	temperatura otoczenia, K
T_p	temperatura atmosfery wewnętrznej pieca, K
T_k	temperatura powierzchni przegrody po wewnętrznej stronie pieca, K
T_s	temperatura powierzchni materiału, K
ε_s	emisyjność nagrzewanego materiału
ε_k	emisyjność materiału izolacyjnego
α	współczynnik wymiany ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$
α_{kon}	konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$
q	gęstość strumienia ciepła, W/m^2
S_s	pole powierzchni nagrzewanego materiału, m^2
S_k	pole powierzchni komory grzewczej, m^2
λ_p	współczynnik przewodzenia ciepła
l	wymiar charakterystyczny, m
Nu	liczba Nusselta

1. Wstęp

Piece grzewcze są najliczniejszą grupą zróżnicowaną konstrukcyjnie. Cechą charakterystyczną pieców komorowych jest zmienność atmosfery wypełniającej komorę roboczą oraz wykorzystanie do ich budowy materiałów ogniotrwałych i izolujących. Wielkość zużytej energii cieplnej, zapewniającej realizację danej technologii nagrzewania wsadu lub obróbki cieplnej istotnie wpływa na koszt produkcji. Znaczne oszczędności paliwa i poprawę wydajności produkcji można osiągnąć poprzez skrócenie czasu procesu, a co za tym idzie zmniejszenie strat ciepła do otoczenia i ciepła zakumulowanego w elementach konstrukcyjnych pieca. Cel ten można osiągnąć dzięki znajomości zmiany temperatury na przekroju wsadu w czasie procesu.

Procesy nagrzewania wsadu należą do zagadnień wymiany ciepła o charakterze niestacjonarnym. Wymiana energii na drodze ciepła w nagrzewanym materiale wynika z kształtującej się różnicy temperatury na powierzchni wsadu i w osi wsadu, przewodności cieplnej materiału z którego wykonany jest wsad oraz ilości energii cieplnej dostarczanej do powierzchni. Czas nagrzewania wsadu można wyliczyć przy użyciu metod przybliżonych analitycznych lub numerycznych. Do prawidłowej oceny zmian temperatury na przekroju wsadu w obu przypadkach konieczne jest podanie warunków brzegowych wymiany ciepła. Możliwe są do zdefiniowania 4 warunki brzegowe [2], ale do oceny ilości dostarczanego ciepła do powierzchni wystarczy znajomość jednego.

Warunki brzegowe na powierzchni ciała stałego mogą być określane kilkoma sposobami. Największe zastosowanie praktyczne mają warunki brzegowe drugiego i trzeciego rodzaju.

Warunki brzegowe drugiego rodzaju określone są przez rozkład gęstości strumienia ciepła na powierzchni brzegowej. Warunki brzegowe trzeciego rodzaju zakładają podanie łatwo mierzalnej temperatury atmosfery pieca oraz trudnego do wyznaczenia współczynnika wymiany ciepła na powierzchni wsadu. Jedną z metod umożliwiających wyznaczenie obu warunków brzegowych jest metoda opierająca się na rozwiązaniach zagadnienia odwrotnego równania przewodzenia ciepła. W tym przypadku gęstość strumienia ciepła lub współczynnik wymiany ciepła na powierzchni chłodzonego materiału jest określony z minimalizacji funkcji celu, która definiuje różnice pomiędzy zmierzonymi a obliczonymi wartościami temperatury. Dla wykorzystywanego na zajęciach programu, warunek brzegowy na powierzchni nagrzewanej poszukiwany będzie w postaci funkcji zależnej od czasu:

$$\dot{q}(\tau) = \alpha_{INV}(\tau) (T_p - T_s(\tau))$$

Na wartość uzyskanego wyniku ma wpływ zarówno wymiana ciepła w wyniku promieniowania pomiędzy powierzchnią wewnętrzną przegród pieca a powierzchnią nagrzewanego materiału, jak również konwekcyjna wymiana ciepła pomiędzy atmosferą pieca (powietrze) a powierzchnią nagrzewanego materiału.

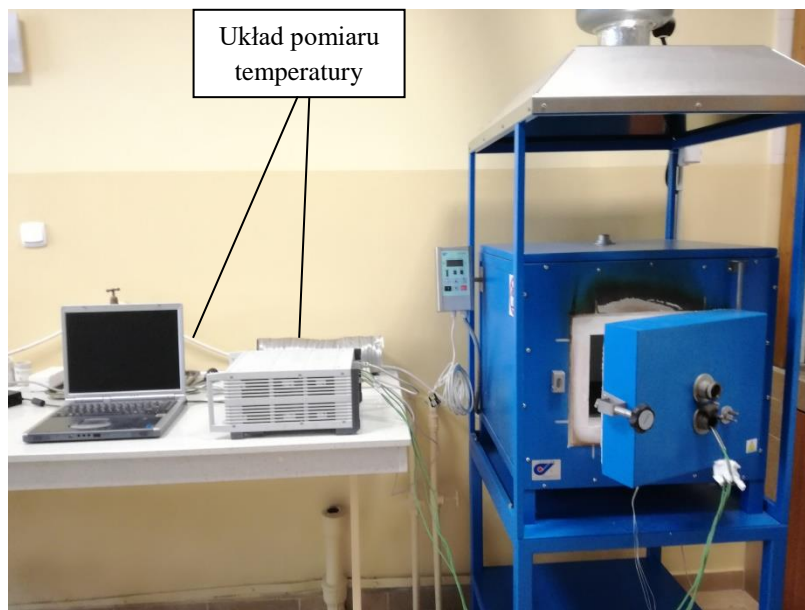
2. Stanowisko badawcze

Proces nagrzewania będzie realizowany w laboratoryjnym piecu muflowym typu FCF 22SHM (rys.1). Konstrukcja przegród pieca składa się z zewnętrznego pancerza (stal węglowa) i izolacji ogniotrwałej wykonanej z kształtek WMI (włókno ceramiczne), których emisyjność wynosi 0,85. W drzwiach pieca znajduje się wziernik oraz otwór rewizyjny. Elementy grzejne komory umieszczone są w specjalnie wykonanych rowkach w trzonie oraz ścianach bocznych, wykonane są z drutu oporowego Kanthal A1, przykryte ceramiczną płytą nośną (węglík krzemu). Maksymalna temperatura nastawy pieca wynosi 1300°C. W komorze pieca znajduje się czujnik temperatury umożliwiający pomiar temperatury atmosfery (powietrze) typu PtRh10 – Pt/S. Wymiary komory grzejnej wynoszą (szer. x wys. x głęb.) 290x220x350mm.



Rys.1. Piec muflowy typ FCF 22SHM

Dane pomiarowe niezbędne do określenia warunku brzegowego za pomocą rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła, uzyskuje się na stanowisku pomiarowym składającym się z elektrycznego pieca oporowego oraz opomiarowanej próbki. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 2. Badaniom poddawany jest walec o wymiarach: $Z=140\text{mm}$ i średnicy $\varnothing=30\text{mm}$ znajdujący się w ułożeniu poziomym (rys.3). Walec jest wykonany ze stopu Inconel. Skład chemiczny badanego materiału zamieszczono w tabeli 1. Emisyjność powierzchni wynosi $\varepsilon=0,5$.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego

Tabela 1. Skład chemiczny

Inconel	zawartość (%)									
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Co	Al
	0,03	0,72	0,20	0,003	<0,007	0,04	23,0	59,4	0,03	1,35

3. Program numeryczny

Wymagane obliczenia numeryczne wykonane zostaną za pomocą programu „walec.exe”, który rozwiązuje równanie przewodzenia ciepła Fouriera w osiowo symetrycznym układzie metodą elementów skończonych. Aby uzyskać rozwiązanie równania odpowiadające rozpatrywanemu procesowi, należy zdefiniować warunki jednoznaczności rozwiązania tego równania. Niezbędne do prawidłowego uruchomienia programu dane początkowe należy wprowadzić do pliku o nazwie alfa0.inp, a warunek brzegowy w pliku par.dat.

Wyniki obliczeń numerycznych znajdują się w plikach:

wynik.dat.

- 1 kolumna - czas, [s]
- 2 kolumna - temperatura końca pręta, $Z=\min, R=0$ [$^{\circ}\text{C}$]
- 3 kolumna - temperatura początku pręta, $Z=\max, R=0$ [$^{\circ}\text{C}$]
- 4 kolumna - średnia temperatura powierzchni bocznej pręta, [$^{\circ}\text{C}$]
- 5 kolumna - gęstość strumienia ciepła, [kW/m^2]
- 6 kolumna - współczynnik wymiany ciepła na początku pręta $Z=\max$, [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
- 7 kolumna - współczynnik wymiany ciepła na początku pręta $Z=\min$, [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
- 8 kolumna - współczynnik wymiany ciepła na powierzchni bocznej pręta, [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]

temp.dat

- 1 kolumna czas [s],
- w kolejnych kolumnach obliczona temperatura w poszczególnych punktach pomiarowych, [$^{\circ}\text{C}$].

4. Wykonanie pomiarów

Pomiar temperatury realizowany będzie za pomocą 3 termoelementów. Lokalizację punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 3. Do pomiaru temperatury zastosowano termoelement typu K w osłonie o średnicy 1000 μm . Dane rejestrowane będą z częstotliwością 1s za pomocą układu pomiarowego o dokładności $\pm 0,2\%$. Dokładność termoelementu została określona przez producenta na poziomie $\pm 0,4\%$ wartości mierzonej temperatury. Dodatkowo dokonywany będzie pomiar temperatury otaczającego powietrza T_a oraz temperatury atmosfery wewnętrznej pieca T_p .

Punkt T_1 : $Z=75\text{mm}$,

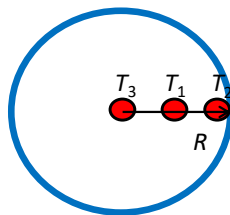
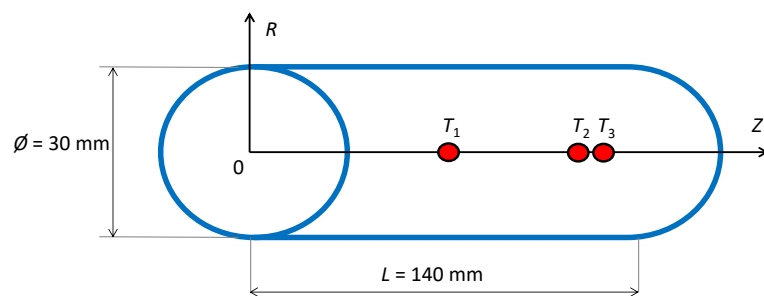
$R=7,5\text{mm}$

Punkt T_2 : $Z=120\text{mm}$,

$R=12\text{mm}$

Punkt T_3 : $Z=130\text{mm}$,

$R=0\text{mm}$



Rys. 3. Rozmieszczenie termoelementów.

5. Zakres przeprowadzanych pomiarów i obliczeń

Ćwiczenie laboratoryjne podzielone jest na dwie części.

W pierwszej części należy obliczyć całkowity współczynnik wymiany ciepła (2) dla zadanych przez prowadzącego warunków początkowych procesu nagrzewania. Uzyskane wyniki należy wprowadzić do pliku o nazwie par.dat, a następnie przeprowadzić obliczenia za pomocą programu walec.exe. Uzyskane wyniki obliczeń pozwolą na analizę zmiany temperatury w trzech punktach pomiarowych od czasu nagrzewania dla wyznaczonego analitycznie całkowitego współczynnika wymiany ciepła.

$$\begin{aligned}
q_{cał} = q_{rad} + q_{kon} &= 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{T_k^4 - T_s^4}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{S_s}{S_k} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - 1 \right)} + \frac{\lambda_p}{l} Nu \cdot [T_p - T_s] \\
&= 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{T_k^4 - T_s^4}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{S_s}{S_k} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - 1 \right)} + \alpha_{kon} [T_p - T_s]
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\alpha_{cał} = \frac{q_{cał}}{T_k - T_s} \tag{2}$$

W drugiej części ćwiczenia dokonywany jest pomiar zmiany temperatury nagrzewanego walca w piecu muflowym. Przed pomiarem należy zapisać temperaturę otoczenia panującą w laboratorium oraz temperaturę początkową próbki. Uzyskane wyniki w postaci zmiany temperatury w 3 punktach pomiarowych należy odpowiednio zapisać w pliku o nazwie tpomiar.dat zgodnie z wytycznymi prowadzącego. Podanie zmierzonej zmiany temperatury jest niezbędnym warunkiem w rozwiązaniach zagadnienia odwrotnego równania przewodzenia ciepła. Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych należy uzupełnić plik o nazwie alfao.inp następującymi informacjami:

- całkowity czas testu do czytania z pliku tpomiar.dat,
- czas zakończenia obliczeń dla testu,
- początkowa temperatura w węzłach interpolacji,
- liczba wywołań normy błędu,
- temperatura atmosfery pieca,
- współrzędne (s) podziałów czasu testu,

stanowiącymi zbiór danych niezbędnych do uruchomienia programu obliczeniowego walec.exe. Następnie należy przeprowadzić obliczenia numeryczne. W wyniku przeprowadzonych badań zostanie wyznaczony warunek brzegowy drugiego rodzaju dla badanego problemu.

6. Sprawozdanie powinno zawierać:

- Temat ćwiczenia, numer grupy laboratoryjnej, listę osób uczestniczących w zajęciach, datę wykonania ćwiczenia.
- Cel ćwiczenia wraz z krótkim opisem przeprowadzanych obliczeń.
- Zestawienie danych początkowych wprowadzonych do pliku wejściowego.

- Obliczenia całkowitego współczynnika wymiany ciepła (wzór wraz z podstawieniami).
- Wyniki obliczeń w postaci wykresów:
 - zmiany temperatury od czasu nagrzewania w 3 punktach pomiarowych dla wyliczonego analitycznie współczynnika wymiany ciepła,
 - zmiany gęstości strumienia ciepła q_{INV} w zależności od temperatury powierzchni T_s ,
 - zmiany gęstości strumienia ciepła q_{INV} w zależności od czasu,
 - porównanie zmiany temperatury zmierzonej z obliczoną w wytypowanych punktach (należy przeprowadzić analizę uzyskanych wyników).
- Wnioski.

Literatura:

- [1] Stefan Wiśniewski, Tomasz S. Wiśniewski „Wymiana ciepła” Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000
- [2] Jan Szargut „Termodynamika” Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa, 2000
- [3] Hobler Tadeusz "Ruch ciepła i wymienniki"

Zakres materiału na zaliczenie:

1. Warunki jednoznaczności rozwiązania równania przewodzenia ciepła.
2. Warunki brzegowe wymiany ciepła (wymienić oraz szczegółowo omówić).
3. Radiacyjny warunek brzegowy, złożone warunki brzegowe.
4. Współczynniki konfiguracji.